

Grado en Ingeniería de Sistemas de Comunicaciones
2018-2019

Trabajo Fin de Grado

“Desarrollo de sistema multiantena en plataformas SDR mediante LabVIEW”

Jose Miguel Lorente Martínez

Tutora

Ana García Armada

Leganés, 2019



[Incluir en el caso del interés de su publicación en el archivo abierto]

Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

Albert Einstein:

*“Haz las cosas lo más simple que puedas,
pero no te limites a lo simple”*

RESUMEN

Las comunicaciones móviles han crecido de forma extraordinaria desde sus inicios, consiguiendo ser una parte imprescindible en el mundo actual. Desde el lanzamiento de la primera generación (1G) de estándares de comunicaciones móviles en la década de 1980, hasta la actualidad, que nos encontramos a las puertas de la quinta generación (5G) ha habido un proceso relativamente breve, pero con pasos agigantados. Este progreso del 1G hasta el 5G ha sido posible gracias a la evolución de la tecnología implementada en las telecomunicaciones. La entrada del uso de múltiples antenas transmisoras y receptoras trabajando simultáneamente en las comunicaciones inalámbricas abrió un mundo de posibilidades que va más allá del 5G.

En el caso de la tecnología MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), que significa múltiples entradas múltiples salidas, ha aportado grandes beneficios y oportunidades dentro de las últimas generaciones de comunicaciones móviles. Gracias a que trabaja con varias antenas transmisoras y receptoras simultáneamente se consigue favorecer del multitrayecto, permitiendo transportar más información, ofreciendo principalmente una mayor tasa de transmisión, menores pérdidas de datos y mayor área de cobertura. Recogido por primera vez en el estándar IEEE 802.11n en 2009, el 4G ha sido el pionero en su uso, mientras que en el 5G se hace impensable no hablar del uso de MIMO, en este caso un uso Masivo de dicha tecnología (*Massive MIMO*), consiguiendo aumentar sus beneficios exponencialmente [1].

Consecuentemente, viendo la importancia de las comunicaciones, en el presente trabajo se va a desarrollar un prototipo de radiocomunicación con múltiples antenas. La idea de este prototipo es la imitación de una conexión de subida (Uplink) real inalámbrica, entre un dispositivo móvil y una estación base. El dispositivo móvil estará compuesto por una sola antena y la estación base por múltiples antenas. Dicho prototipo se llevará a cabo mediante un software, LabVIEW, que se encargará de programar los dispositivos USRPs. Estos dispositivos programables, se usarán como receptores y transmisores y serán los encargados de realizar las comunicaciones radio a través de sus antenas.

A lo largo del proyecto se van a realizar diferentes medidas del prototipo de sistema definido por software (SDR) con el uso de múltiples antenas trabajando simultáneamente. Antes de realizar las mediciones se aportará una introducción teórica, para comprender los conceptos utilizados en el desarrollo del proyecto. Se detallará la instrumentación hardware y software utilizada, especificando todas las conexiones entre los diferentes equipos. Finalmente, después de dichas mediciones se llevará a cabo un análisis y evaluación de los resultados obtenidos hasta llegar a las conclusiones del proyecto y unas posibles líneas a futuro.

Palabras clave: Comunicaciones móviles; comunicaciones inalámbricas; tecnología multiantena; MIMO; 5G; LabVIEW; radio definida por software; SDR.

ABSTRACT

Since the beginning of telecommunications, the use of mobile phones has increased extraordinarily, to the point of being indispensable to modern life. From the 1980s, when the first generation of standard mobile communication (1G) was launched, to now, the brink of the fifth generation (5G), the technology has developed remarkably quickly. However, each step in this development has been huge. This progress, from 1G to 5G, has been possible thanks to the evolution of telecommunications technology. More specifically, the introduction of wireless communication, in which multiple antennas and receivers work together simultaneously, has opened a world of possibility that goes far beyond 5G.

The introduction of MIMO technology (Multiple Input Multiple Output) has provided countless benefits and opportunities within more recent generations of wireless communication. This technology works with various transmission and receivers antennas at once, therefore favouring multiple trajectories, making it possible to transport more information. Not only this, but it offers a larger transmission rate, less loss of data and a greater area of reception. Seen for the first time in the standard IEEE 802.11 in 2009, 4G was the pioneer, whilst 5G made MIMO absolutely necessary. In this case, Massive MIMO has exponentially increased the benefits of this technology [1].

Considering the importance of communications, this project aims to develop a prototype of radiocommunication with multiple antennas. The idea is to imitate a live wireless upload connection (Upink) between a mobile device and a base station. The mobile will be composed of just one antenna, and the base station will have various. The said prototype will be implemented by means of LabVIEW software, which will program the USRP devices. These programmable devices will be used as receivers and transmitters, in order to carry out radio communication with their antennas.

Over the course of the project, various measurements of the prototype defined by SDR software will be created, with various antennas working simultaneously. Before measuring, an introduction to the theory will be provided, in order to better understand the concepts used in the development of the project. There will also be a detailed description of the hardware utilized, specifying all of the connections between the various pieces of equipment. Finally, after the measurements have been taken, there will be an

analysis and evaluation of the results obtained, until a conclusion and possible future lines of investigation or development are identified.

Key words: Mobile Communications; wireless Communications; multi-antenna technology; MIMO; 5G; LabVIEW; software-defined radio; SDR.

AGRADECIMIENTOS

En este tramo final dónde me encuentro realizando el trabajo final de grado, me gustaría agradecer a todos y cada uno de los que me han acompañado a lo largo de este camino. Un camino duro pero lleno de ilusiones dónde he crecido y aprendido en diferentes aspectos de mi vida. Adquiriendo las habilidades necesarias para poder desarrollarme en un mundo profesional.

En primer lugar, gracias a mi familia, sin el apoyo, dedicación y confianza que han depositado en mí durante estos años, nada habría sido posible.

También, debo mencionar a mis compañeros de universidad y amigos, que después de tantas batallas luchando juntos tengo mucho que agradecerles. En especial a mi gran descubrimiento de estos años, Mila.

Y, por último, a los profesores. Gracias por compartir con todos nosotros vuestro conocimiento. Ha sido un verdadero placer para mí haber sido vuestro alumno. En especial mención a Kun Chen, por su paciencia y dedicación, y a Ana García Armada, mi tutora, que me ha dado la oportunidad de finalizar esta etapa con un proyecto colaborativo, que me ha terminado de despertar una inquietud en el mundo de las telecomunicaciones.

A todos vosotros, muchas gracias.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	IV
ABSTRACT	VI
AGRADECIMIENTOS	IX
ÍNDICE GENERAL	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
ÍNDICE DE TABLAS	XVI
Capítulo 1 : INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivo del proyecto.....	2
1.3. Estructura de la memoria	3
Capítulo 2 : ESTADO DEL ARTE	6
2.1. Introducción a la tecnología multiantena	6
2.2. Modulación QPSK	14
2.3. Introducción a SDR y LabVIEW	15
2.4. Líneas de trabajo actuales.....	17
Capítulo 3 : EQUIPAMIENTO IMPLICADO EN LA CREACIÓN DEL PROTOTIPO	21
3.1. Dispositivo USRP – 2942R	22
3.2. NI PXIe – 1085	24
3.3. OctoClock-G CDA-2990.....	25
3.4. Ordenador y osciloscopio	26
Capítulo 4 : IMPLEMENTACIÓN Y MEDIDAS DE LOS PROTOTIPOS MULTIANTENA EN LABVIEW	28
4.1. Sincronismo	28
4.1.1. Conexión hardware	29

4.1.2.	Conexión software	35
4.2.	Calibración del seno.....	40
4.2.1.	Implementación de la calibración del seno en LabVIEW	41
4.2.2.	Medición de la calibración del seno	52
4.3.	Modulación QPSK	55
4.3.1.	Implementación de la modulación QPSK en LabVIEW	56
4.3.2.	Medición de la modulación QPSK	66
Capítulo 5 : ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS OBTENIDAS EN LA IMPLEMENTACIÓN.....		69
5.1.	Calibración del seno.....	69
5.1.1.	En tiempo	69
5.1.2.	En frecuencia	70
5.2.	Modulación QPSK	71
5.2.1.	Constelación	71
5.2.2.	Diagrama de ojo.....	71
Capítulo 6 : CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO		74
6.1.	Conclusiones	74
6.2.	Líneas futuras de trabajo	75
ANEXOS		78
Anexo A: Marco regulador		78
A.1.	Regulación.....	78
A.2.	Estándares.....	80
A.3.	Propiedad intelectual	80
Anexo B: Entorno socioeconómico		82
B.1.	Impacto socioeconómico del proyecto.....	82
B.2.	Impacto medioambiental del proyecto	83
B.3	Planificación del proyecto	83

B.4 Presupuesto del proyecto	85
Anexo C: Resumen en inglés de todos los contenidos	86
C.1. Introduction	86
C.2. State of art.....	86
C.3. Equipment used in the project	89
C.4. Prototype implementation	90
C.5. Analysis and conclusions of the Project	94
Anexo D: Diagrama de bloques de las implementaciones del prototipo.....	96
D.1 Diagrama de bloques de calibración del seno	97
D.2 Diagrama de bloques de la modulación QPSK.....	100
BIBLIOGRAFIA	103

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 1. SISTEMA DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS SISO	7
FIG. 2. SISTEMA DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS MISO	8
FIG. 3. SISTEMA DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS SIMO	9
FIG. 4. SISTEMA DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS MIMO	9
FIG. 5. MODELO DE CANAL SISTEMA MIMO	10
FIG. 6. CANAL TDD vs FDD [7]	11
FIG. 7. TRAFICO BAJADA, TECNOLOGÍA MISO	12
FIG. 8. TRAFICO BAJADA, TECNOLOGÍA SIMO	13
FIG. 9. CONSTELACIÓN MODULACIÓN QPSK [11]	14
FIG. 10. EJEMPLO SOFTWARE LABVIEW COMMUNICATIONS	16
FIG. 11. PROYECTO 5G UNIVERSIDADES DE BRISTOL Y LUND	18
FIG. 12. ESQUEMA DE CONEXIÓN HARDWARE	21
FIG. 13. EQUIPO FUNCIONAL DEL LABORATORIO	21
FIG. 14. DISPOSITIVO NI USRP-2942R	23
FIG. 15. PLATAFORMA NI PXIE-1085	24
FIG. 16. DISTRIBUIDOR DE RELOJ – MODELO OCTOCLOCK-G CDA-2990	25
FIG. 17. OSCILOSCOPIO DIGITAL - DSO90604A DIGITAL STORAGE OSCILLOSCOPE	26
FIG. 18. ESQUEMA CONEXIONES HARDWARE DEL SINCRONISMO	30
FIG. 19. PPS DE 1 HZ, DE USRP - PXIE	31
FIG. 20. PPS DE 1 HZ, DE PXIE – DISTRIBUIDOR DE RELOJ	32
FIG. 21. RELOJ DE 10MHZ, DE PXIE – DISTRIBUIDOR DE RELOJ	33
FIG. 22. PPS DE 1 HZ, DE DISTRIBUIDOR DE RELOJ - USRP	34
FIG. 23. RELOJ DE 10MHZ, DE DISTRIBUIDOR DE RELOJ - USRP	35
FIG. 24. IMAGEN TARJETA DE SINCRONISMO	36
FIG. 25. CONEXIÓN SINCRONISMO MEDIANTE NI MAX EN PC	38
FIG. 26. THRESHOLD DEL PIN PFI0 MEDIANTE NI MAX EN PC	39
FIG. 27. SALIDA PPS DEL USRP DE REFERENCIA	39
FIG. 28. PARTE 1 DIAGRAMA DE BLOQUES Tx CALIBRACIÓN DEL SENO	41
FIG. 29. PARTE 2 DIAGRAMA DE BLOQUES Tx CALIBRACIÓN DEL SENO	42
FIG. 30. PARTE 3 DIAGRAMA DE BLOQUES Tx CALIBRACIÓN DEL SENO	43
FIG. 31. PANEL DE CARACTERÍSTICAS Tx CALIBRACIÓN DEL SENO	44

FIG. 32. PARTE 1 DIAGRAMA DE BLOQUES RX CALIBRACIÓN DEL SENO	46
FIG. 33. PARTE 2 DIAGRAMA DE BLOQUES RX CALIBRACIÓN DEL SENO	48
FIG. 34. PANEL DE CARACTERÍSTICAS RX CALIBRACIÓN DEL SENO	50
FIG. 35. SEÑAL TRANSMITIDA-CALIBRACIÓN DEL SENO	52
FIG. 36. COMPARATIVA RECEPCIÓN DE LA SEÑAL SENO – PARTES REAL E IMAGINARÍA... 53	
FIG. 37. COMPARATIVA SUMA DE LAS SEÑALES RECIBIDAS – PARTE REAL E IMAGINARÍA 53	
FIG. 38. CORRECCIÓN DE FASE – LABVIEW.....	54
FIG. 39. RECEPCIÓN DE LA SEÑAL SENO – ESPECTRO.....	55
FIG. 40. PARTE 1 DIAGRAMA DE BLOQUES TX – MODULACIÓN.....	57
FIG. 41. PARTE 2 DIAGRAMA DE BLOQUES TX – MODULACIÓN.....	58
FIG. 42. PARTE 3 DIAGRAMA DE BLOQUES TX - MODULACIÓN	59
FIG. 43. PANEL CARACTERÍSTICAS TX MODULACIÓN.....	60
FIG. 44. PARTE 1 DIAGRAMA DE BLOQUES RX MODULACIÓN	61
FIG. 45. PARTE 2 DIAGRAMA DE BLOQUES RX MODULACIÓN	62
FIG. 46. PARTE 3 DIAGRAMA DE BLOQUES RX MODULACIÓN	63
FIG. 47. PANEL CARACTERÍSTICAS RX MODULACIÓN.....	64
FIG. 48. MEDICIÓN CONSTELACIÓN EN TX.....	66
FIG. 49. MEDICIÓN CONSTELACIÓN EN RX.....	67
FIG. 50. DIAGRAMA DE GANTT PLANIFICACIÓN.....	84

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO	84
TABLA 2. PRESUPUESTO DEL PROYECTO.....	85

Capítulo 1 : INTRODUCCIÓN

1.1.Motivación

La necesidad y la inquietud humana han conseguido que la ciencia y la tecnología se junten dando lugar a la ingeniería. Gracias a esto, las telecomunicaciones se han desarrollado a un ritmo imparable a lo largo de las últimas décadas, dónde en la actualidad, las comunicaciones inalámbricas han llegado a cosas que eran impensables. Como, por ejemplo, la capacidad de poder comunicarse o realizar una video llamada con cualquier parte del mundo a cualquier hora de forma instantánea, hace de las comunicaciones algo sorprendente.

A día de hoy, aproximadamente el 95% de la población mundial tienen cobertura de telefonía móvil [2], esto crea una rápida evolución y un continuo crecimiento en el ámbito de las telecomunicaciones. Gracias a esta necesidad, la investigación en esta área es muy amplia, dando paso al uso de nuevas tecnologías. Uno de los estándares de comunicaciones que más impacto ha tenido en su lanzamiento ha sido el 4G. Este estándar de comunicaciones móviles implementa la tecnología MIMO, que fue tan revolucionaria por ofrecer altas velocidades de internet y bajas pérdidas de datos. Dados que los resultados son muy favorables en el 4G, en la quinta generación (5G) de estándares de comunicaciones móviles, la tecnología MIMO será usada también.

Por otro lado, el mundo profesional ha dado un giro de 180 grados en los últimos años con la transformación digital, dónde las empresas luchan por la búsqueda de la innovación tecnológica. Las barreras profesionales en el ámbito internacional cada vez son más pequeñas. Esto crea un gran potencial que apuesta por la innovación y la búsqueda de nuevas prestaciones y servicios, que puedan cubrir las necesidades de una población cada vez más exigente.

Prestando atención a los puntos descritos, este trabajo de fin de grado que estoy desarrollando es un gran reto de innovación tecnológica y una verdadera motivación para mí. Puesto que las comunicaciones móviles son una parte imprescindible de la sociedad y que su crecimiento hacia el desarrollo de nuevas tecnologías es infinito, siendo una esfera llena de oportunidades, innovaciones, motivaciones y futuro.

1.2.Objetivo del proyecto

Las comunicaciones móviles buscan el objetivo de cubrir las necesidades de la población. La tecnología se encuentra en un estado de cambio constante y cada vez son más los descubrimientos de nuevos métodos o modelos a seguir, para mejorar las telecomunicaciones. Gracias en mayor parte a las universidades encargadas de realizar estudios innovadores en cada ámbito, se consiguen cambios favorables en la tecnología y, con ello en la humanidad.

En este proyecto, se busca conseguir un prototipo de sistemas de comunicaciones inalámbricas que se ajuste a las necesidades de la sociedad, es decir, obtener un prototipo cuyos resultados de transmisión sean favorables. Uno de los principales objetivos de este trabajo es familiarizarse con las comunicaciones Radio Definidos por Software (SDR), para conseguir crear prototipos que aporten grandes mejoras en los sistemas actuales.

También aportar a la Universidad Carlos III un estudio documental del funcionamiento de las comunicaciones SDR mediante LabVIEW, para que los nuevos alumnos que se quieran enfocar en esta área tengan una base firme donde empezar, y así poder llegar más lejos en las investigaciones. Por otro lado, el asentamiento y llevada a la práctica de todos los conceptos que he adquirido durante la carrera, es otro de los objetivos del proyecto.

1.3.Estructura de la memoria

En el presente proyecto, se quiere conseguir que, llegado a su fin, el lector haya conseguido comprender como funcionan los sistemas multiantena con SDR. Se pretende un entendimiento tanto de la parte hardware y conexiones, como de la parte software, LabVIEW. Consiguiendo que cada uno pueda crear un prototipo de sistemas SDR.

A continuación, se detalla la estructura de la memoria, dando una breve introducción a cada uno de los capítulos presentes en el trabajo.

- **Capítulo 1:** Introducción del proyecto. Se detallan tanto las motivaciones como el objetivo de dicho proyecto, aportando una visión general del mundo de las telecomunicaciones en la actualidad.
- **Capítulo 2:** Estado del arte. Contempla la parte conceptual del proyecto, para facilitar el entendimiento de los capítulos posteriores. Primero contextualiza la situación actual de las telecomunicaciones especificando la tecnología usada actualmente, presentando el prototipo del presente proyecto. Luego hace una pequeña introducción del software utilizado, LabVIEW. Y acaba con líneas similares de trabajo en otras universidades.
- **Capítulo 3:** Recursos hardware empleados. Contiene una explicación detallada de los medios hardware que intervienen en el proyecto, así como la interconexión entre ellos.
- **Capítulo 4:** Implementación y medidas del prototipo multiantena en LabVIEW. Este capítulo está dividido en tres partes principales: sincronismo; calibración del seno; y modulación QPSK. Cada una de las partes, contiene detalladamente tanto

la realización de su implementación como, las medidas realizadas del prototipo y gráficas correspondientes para su mejor explicación.

- **Capítulo 5:** Análisis de los resultados obtenidos en las medidas del capítulo 4. Aquí se realiza un estudio de análisis de las diferentes graficas medidas en las implementaciones.
- **Capítulo 6:** Conclusiones y trabajos a futuro. El último capítulo presenta las conclusiones del proyecto, así como un apartado dónde se plantea unas posibles líneas de trabajos a futuro, para continuar con la investigación del proyecto.

Por último, también se presenta una bibliografía, con el formato IEEE para citar las referencias. Y se adjuntan cuatro anexos, los cuales constan de:

- **Anexo A:** Marco regulador. Contiene las regulaciones actuales del sector, los estándares técnicos implicados y cuestiones de propiedad intelectual.
- **Anexo B:** Entorno socioeconómico. Incluye el presupuesto del proyecto y la planificación de este. Además, se valora el impacto de dicho proyecto en la sociedad.
- **Anexo C:** Resumen de contenidos en inglés. Se aporta un resumen del trabajo en inglés de las partes más importantes.
- **Anexo D:** Esquemas completos de los diagramas de bloque de los prototipos programados en LabVIEW. Debido a su gran tamaño, durante la memoria solo se han incluido partes de dichos diagramas.

Capítulo 2 : ESTADO DEL ARTE

Como se hablaba anteriormente, el uso de múltiples antenas en las comunicaciones inalámbricas ha marcado una gran diferencia en la historia de las telecomunicaciones. La tecnología MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) consiguió entrar y consolidarse en los estándares móviles de LTE (*Long Terminal Evolution*) usado en el 4G y el WiFi. Hablando de la llegada de la quinta generación (5G) de estándares de telefonía móvil, todo está apostado al uso de la tecnología MIMO, pero en este caso se habla de *Massive MIMO*, es decir, dotando la estación base con 128 antenas y más. Todo este esfuerzo, que la sociedad está reclamando por la inminente llegada del mundo de las cosas, donde se prevé un tráfico de miles de millones de dispositivos móviles conectados, demandando un gran consumo de datos en tiempo real.

En el siguiente apartado del capítulo 2 se va a explicar la introducción teórica de los conceptos de la tecnología multiantena que existen, haciendo hincapié en esta tecnología, que lleva de la mano el 5G. La característica principal que se busca con el 5G es la capacidad que permita el desarrollo de un ecosistema del Internet de las Cosas (*Internet of Things, IoT*) masivo, con miles de millones de dispositivos conectados a la vez. Capaces de tener velocidades altas y latencia muy baja [3].

2.1.Introducción a la tecnología multiantena

Las comunicaciones móviles multiantena en función del esquema que sigan pueden verse favorecidas por diversidad o por capacidad. Estos sistemas han ido evolucionando y mejorando sus prestaciones a lo largo de la historia de las telecomunicaciones. La tecnología MIMO, que después de años de investigación realizando prototipos, se consiguió recoger en el estándar IEEE 802.11n en el año 2009 y fue usando en los estándares de comunicaciones como WIFI y LTE [4]. Desde entonces esta tecnología no ha hecho más que mejorar de forma vertiginosa la calidad de las radiocomunicaciones. Antes de introducir los diferentes tipos de sistemas multiantena

existentes, se quiere aclarar que en las comunicaciones móviles existen dos tipos de tráfico [5]:

- El tráfico de subida (*Uplink*), es la comunicación que se establece desde la antena del dispositivo móvil, como transmisor (Tx), hasta la antena de la estación base, como receptor (Rx).
- El tráfico de bajada (*Downlink*), es la comunicación que se establece desde la antena de la estación base, como transmisor (Tx), hasta la antena del dispositivo móvil, como receptor (Rx).

Los diferentes tipos de las comunicaciones móviles multiantena existentes, se pueden clasificar en función del número de antenas que existan en cada uno de los extremos, diferenciándose entre [6]:

- 1) SISO (*Single Input Single Output*): Única antena transmisora (Tx) y única antena receptora (Rx).

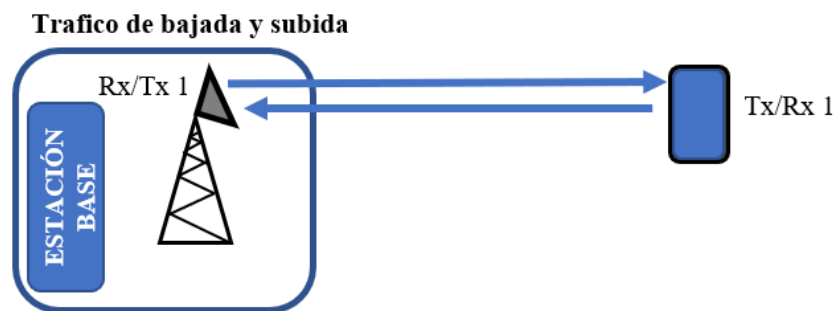


Fig. 1. Sistema de comunicaciones inalámbricas SISO

La tecnología SISO, figura 1, es la precedente a los sistemas de conexiones inalámbricas multiantena que se verán a continuación. Este esquema de comunicaciones simple presenta un único receptor y un único transmisor. Siendo el tráfico de subida del terminal móvil a la estación base; y, al contrario, el tráfico de bajada desde la estación base hasta el dispositivo móvil.

- 2) MISO (*Multiple Input Single Output*): Múltiples antenas transmisoras y única antena receptora.

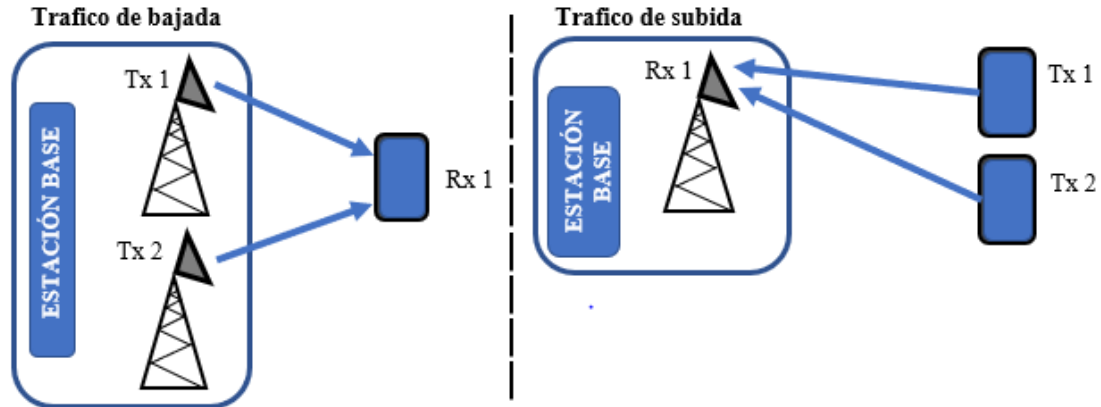


Fig. 2. Sistema de comunicaciones inalámbricas MISO

La tecnología MISO, figura 2, se establece cuando existen varias antenas transmisoras y una única receptora. Como se observa en la figura 2, en el tráfico de bajada el esquema MISO estaría compuesto por múltiples antenas en la estación base y un único receptor, el dispositivo móvil. Por el contrario, en el tráfico de subida el sistema MISO tendría múltiples antenas transmisoras en el mismo dispositivo, o múltiples dispositivos funcionando a la vez, enviando a una única antena receptora, la estación base.

- 3) SIMO (*Single Input Multiple Output*): Única antena transmisora y múltiples antenas receptoras.

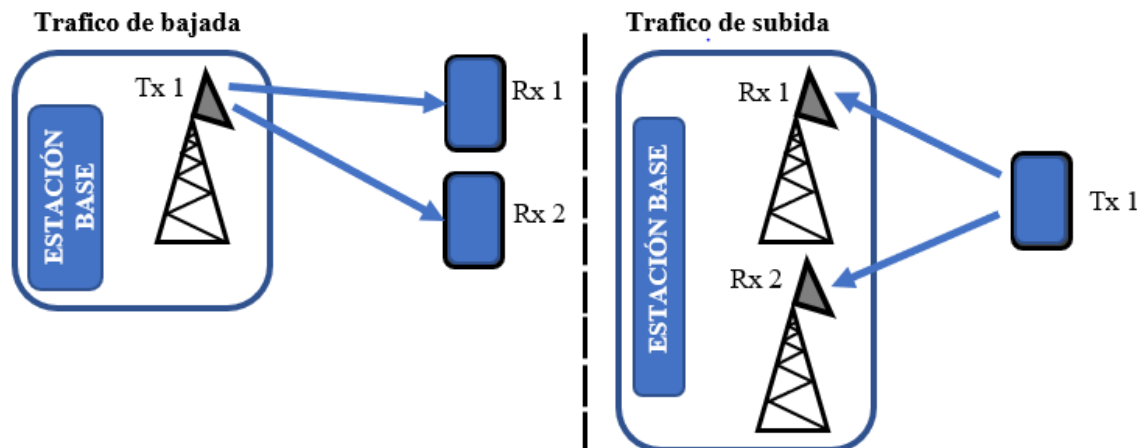


Fig. 3. Sistema de comunicaciones inalámbricas SIMO

La tecnología SIMO, representada en la figura 3, se consigue cuando en la comunicación existente es entre una única antena transmisora y múltiples antenas receptoras. Por lo que, en el tráfico de bajada se tendrá una única antena en la estación base transmitiendo a un dispositivo con múltiples antenas receptoras, o múltiples dispositivos diferentes con una antena receptora cada uno. En cuanto al tráfico de subida se tendría una única antena de un dispositivo móvil transmitiendo a múltiples antenas receptoras de la estación base. Y, por último,

- 4) MIMO (*Multiple Input Multiple Output*): Múltiples antenas transmisoras y múltiples antenas receptoras.

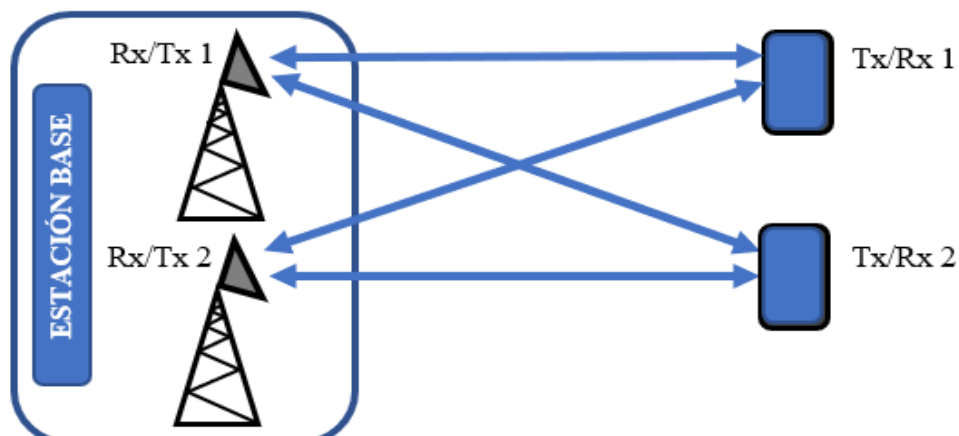


Fig. 4. Sistema de comunicaciones inalámbricas MIMO

En la tecnología MIMO, figura 4, al tener un esquema de múltiples antenas tanto en la transmisión como en la recepción, existe el envío múltiple de señales por diferentes canales al mismo tiempo. Y tanto el tráfico de subida como el de bajada presenta el mismo esquema de múltiples transmisores y múltiples receptores en ambos lados de la comunicación, estación base y dispositivo móvil.

La tecnología multiantena se beneficia de la diversidad o de la capacidad. Haciendo de su uso grandes ventajas con respecto a otros métodos usados. Pero la estimación del canal es más compleja, a la hora de que aumentan sus antenas.

A continuación, en la figura 5, se presenta un ejemplo de esquema genérico de un modelo de canal MIMO, para comprender cómo se estima el canal.

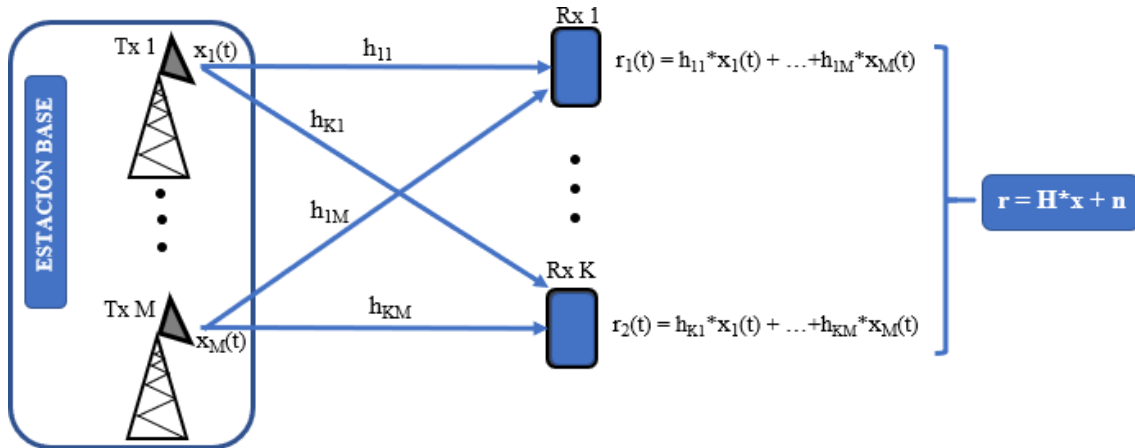


Fig. 5. Modelo de canal sistema MIMO

Al tener M antenas transmisoras, y K antenas receptoras, se crea en cada recepción una suma de todos los canales transmitidos. Esto hace que se pueda tratar el canal como una matriz (H) para conseguir recuperar las diferentes señales transmitidas.

Donde H es:

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & \cdots & h_{K1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{1M} & \cdots & h_{KM} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Uno de los principales problemas de la tecnología multiantena, como está ocurriendo con Massive MIMO es la estimación del canal, donde se requiere muchas secuencias ortogonales. Dichas secuencias son muy escasas, en caso de reutilización, se pueden generar interferencias. Estudiando como la capacidad de estimación del canal puede ser más sencilla, se ha optado por el uso de TDD (Time Division Duplexing). Basándose en el modo TDD, donde el canal de subida se trata de la misma manera que el canal de bajada aportando reciprocidad y, con ello simplicidad. Ya que, el dispositivo móvil envía pilotos a la estación base (tráfico de subida, *Uplink*), la estación base recibe estos pilotos para la estimación del canal. Y se reutiliza para el canal de bajada (*Downlink*), ya que es igual que el canal de subida.

La principal característica que presentan los canales TDD es el uso de la misma frecuencia tanto para el tráfico de subida, como para el tráfico de bajada. Pero el gran inconveniente de TDD es el Half-duplex, lo que significa que no recibe y transmite simultáneamente, al usar la misma banda de frecuencias existe un espacio temporal entre las señales de bajada y de subida. Porque requiere de una banda de guarda para evitar solapamientos [7].

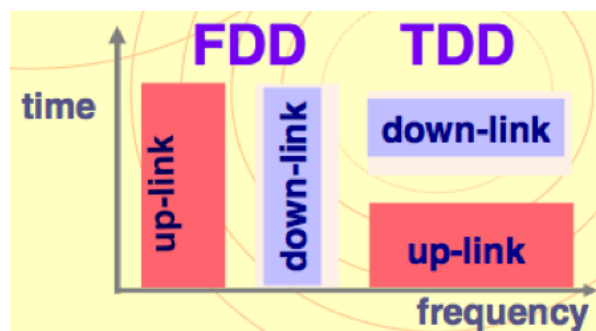


Fig. 6. Canal TDD vs FDD [7]

Actualmente el 4G funciona con FDD, que a pesar de poseer numerosas ventajas como ser Full-Duplex, es decir, transmisión y recepción de señales simultáneamente. Para 5G se pretende cambiar de FDD a TDD, ya que, gracias al uso de una sola banda de

frecuencia para los tráficos de bajada y subida, éste ofrece una gran simplicidad a la hora de estimar el canal. Además, presenta ventajas extra frente al uso de FDD como [8]:

- La eficiencia espectral, ya que usa la misma frecuencia en el tráfico de bajada y que en el de subida.
 - Menor coste de inversión porque no necesita de diplexores para separar las frecuencias.
-
- **Prototipo del proyecto**

Centrándose en el escenario creado por este proyecto, se quiere imitar una estación base con múltiples antenas y una única antena transmisora en el dispositivo móvil. Se particularizan los diferentes tipos de tecnología multiantena, vistos, a este escenario, en función del tráfico de subida y de bajada, donde se tiene:

- En el tráfico de bajada, se usará tecnología MISO (figura 7), viendo un esquema de comunicación con múltiples antenas transmisoras en la estación base que solo envían a una antena receptora en el dispositivo móvil.

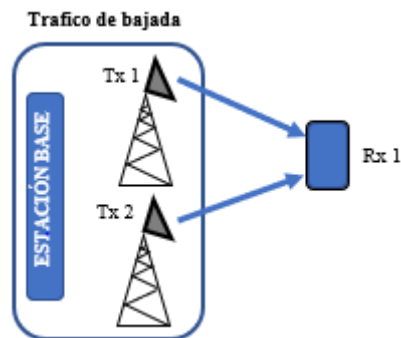


Fig. 7. Tráfico bajada, tecnología MISO

- En el tráfico de subida, al contrario, se usará tecnología SIMO (figura 8), siguiendo un esquema donde el dispositivo móvil transmite desde su

antena hacia las múltiples antenas receptoras de la estación base. Este caso será el desarrollado en las diferentes implementaciones.

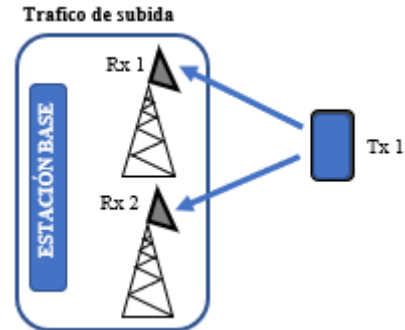


Fig. 8. Trafico bajada, tecnología SIMO

- **Beneficios obtenidos en el prototipo del proyecto**

Centrando el proyecto en el tráfico de subida, se obtiene un sistema SIMO. Como se ha explicado, puede haber dos tipos de ganancia, por capacidad o por diversidad. Por capacidad como dice el teorema de Shannon [9] donde: $C = A * \log_2(1 + SNR)$, siendo la SNR = Relación señal a ruido [dB] y $A = \min(M, K)$, siendo el número de antenas transmisoras (M) y receptoras (K). Por lo que, un sistema SIMO no presenta ganancia en capacidad, puesto que el número de antenas en el transmisor es 1, y entonces A sería 1 también.

Consecuentemente, el sistema que se tiene (SIMO) presenta ganancia por diversidad. Esto se debe al uso de múltiples antenas (K) en la recepción. Pues se crean múltiples canales de comunicaciones (K), tantos como antenas receptoras. Como las antenas en la estación base están lo suficientemente separadas, se puede considerar que los canales que se forman entre las diferentes antenas están totalmente incorrelados. Por lo tanto, en el sistema se tienen K canales independientes entre el dispositivo móvil y la estación base. Y, se puede decir, que: $E\{H_i H_j^*\} = 0$, la esperanza entre los diferentes canales que se forman es nula. Donde el canal i es diferente del canal j. Y con ello se asegura la ganancia por diversidad. Pues si un canal falla, como los demás no son

dependientes, la comunicación inalámbrica sigue siendo fiable. Como es de esperar, cuanto mayor sea el número de antenas, mayor será la ganancia por diversidad y su fiabilidad.

2.2.Modulación QPSK

La modulación QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*) es una modulación digital que viene de la modulación del desplazamiento en fase, con un número limitados de estados. Esta modulación también conocida como modulación 4-QAM, que pese a las diferencias entre las modulaciones PSK y QAM, estas dos específicas modulaciones presentan las mismas características [10].

Su representación es en una constelación con cuatro puntos equidistantes del centro de origen de coordenadas. Siendo cuatro el número de posibles fases que puede tomar, véase figura 9. Estos modelos de modulación son usados para aumentar la calidad de los sistemas de comunicaciones, pudiendo aumentar la cantidad de información a transmitir, sin aumentar su ancho de banda, teniendo especial cuidado con la calidad del canal, porque a mayores modulaciones mayor es la sensibilidad frente a las interferencias y ruidos [10] [11].

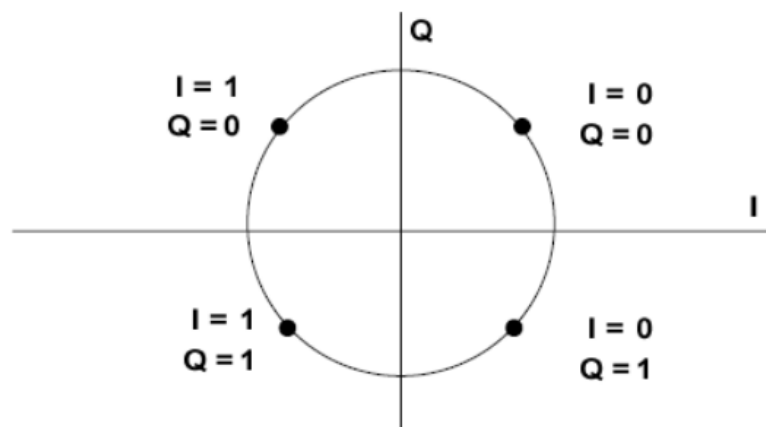


Fig. 9. Constelación modulación QPSK [11]

2.3.Introducción a SDR y LabVIEW

SDR (*Software Defined Radio*), cuyo significado es Radio Definida por Software, es un sistema de radiocomunicaciones donde los elementos hardware, como los USRPs, pueden ser implementados a través de software, mediante un ordenador. Es de gran utilidad por dos razones [12]:

- Permite el cambio de forma sencilla de la configuración de los protocolos y formas de onda.
- Permite la puesta en práctica sencilla de muchos prototipos creados teóricamente.

SDR hace posible que la innovación en las telecomunicaciones progrese de forma más rápida, por la flexibilidad que aporta. Gracias a que permite la creación de prototipos, pudiendo ver resultados y medidas antes de su lanzamiento real, así consigue optimizar errores previos que puedan surgir. La plataforma SDR creada en este proyecto ha utilizado el software LabVIEW.

LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) comercializa por National Instruments y con orígenes en Texas, USA. Tuvo su primer lanzamiento fue el 1986 y hasta el momento ha ido creciendo y dando oportunidades en el mundo de las telecomunicaciones. National Instruments, gracias a LabVIEW, ha conseguido posicionarse como empresa puntera en venta de productos software, hardware y servicios [13].

Como se venía mencionando, LabVIEW es un software de ingeniería de sistemas que facilita pruebas, diseño y control rápido de hardware real o simulado. Es un tipo de programación gráfica, a diferencia de otros lenguajes de programación, aporta una visión más sencilla de cada aspecto de su aplicación. Es de gran utilidad por su rápida y amplia integración de hardware, y por su enfoque de programación gráfico [14] [15].

Dentro de la programación LabVIEW, en este proyecto se ha utiliza una Suite específica, llamada LabVIEW Communications. Que es la combinación de LabVIEW NXG (versión nueva de LabVIEW, autómatas) y herramientas específicas establecidas para la creación rápida de prototipos de sistemas de comunicaciones inalámbricas [16] [17]. Su descarga es comercial y necesitas licencia para poder hacer uso de ella. A través de la página web de National Instruments se puede consultar toda la información requerida.

La elección de esta versión de LabVIEW se debe a la especialización del software a las necesidades del proyecto. A continuación, en la figura 10, se muestra un ejemplo de programación en bloques en LabVIEW Communications.

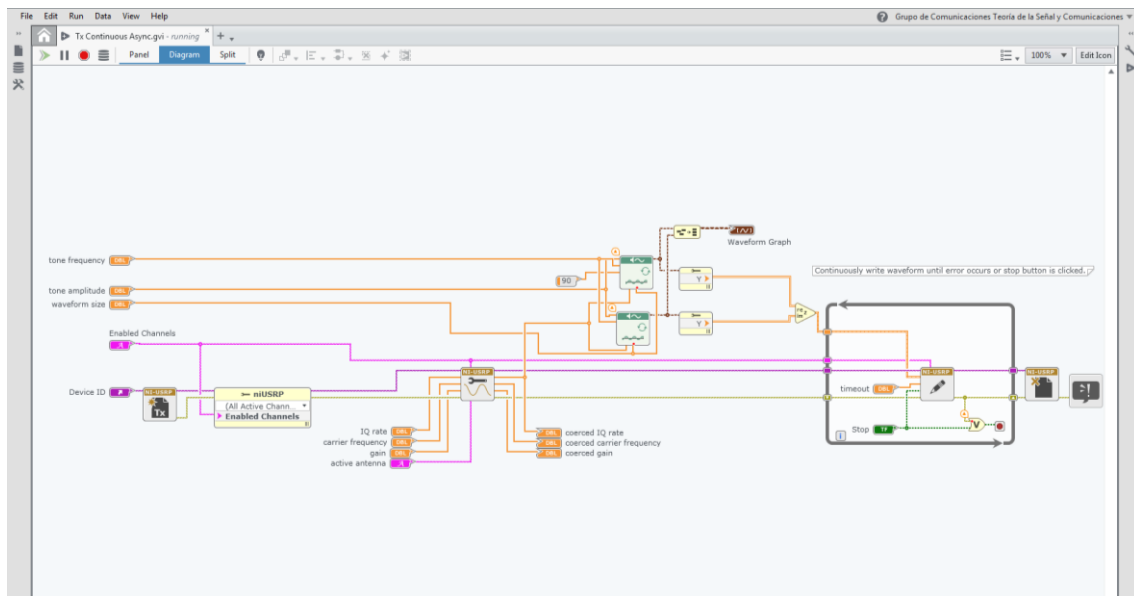


Fig. 10. Ejemplo Software LabVIEW Communications

Como se observa en la figura 10, LabVIEW Communications nos permite la programación, mediante bloques, del hardware (USRPs), consiguiendo modificar fácilmente las características de los sistemas de comunicaciones inalámbricas para crear

el prototipo deseado. Gracias a sus bloques preprogramados, se simplifica la complejidad de la realización de prototipos.

A lo largo del proyecto se mostrarán las configuraciones en LabVIEW Communications de los prototipos creados. Dicha configuración estará dividida en dos bloques diferentes, el transmisor y el receptor, pero que deben prestar características comunes para que su comunicación sea posible. Por lo que en el capítulo 4, donde se lleva a cabo la implementación de los prototipos, se mostrarán ambos bloques, transmisor y receptor, y se explicará cada uno con mayor detenimiento.

2.4.Líneas de trabajo actuales

El área de investigación en las telecomunicaciones es muy amplia, y son cada vez más los que apuestan por innovar y desarrollarse en esta esfera. Pero, cuenta con un inconveniente, el equipamiento de todo el hardware capaz de crear prototipos de sistemas de comunicaciones inalámbricas tiene un coste muy elevado, lo que imposibilita a la hora de poder investigar, si no se posee de los recursos más actuales. La Universidad Carlos III, tiene el gran privilegio de contar con un equipamiento de lo más sofisticado en este ámbito, al igual que otras universidades con prestigio internacional. Por ello, en este apartado se va a presentar un proyecto prestigioso a nivel mundial que se han realizado con la colaboración de dos universidades específicas de Europa, dónde se ha utilizado el mismo hardware y software que la Universidad Carlos III posee.

Presentación universidades:

- La Universidad de Bristol, Reino Unido, fue considerada en el año 2015-2016 por el ranking *QS World University Rankings* la universidad número 37 del mundo [18].
- La Universidad de Lund, Suecia, se considera entre una de las 100 universidades mejores del mundo [19].

Su proyecto en conjunto, llevado a cabo en marzo de 2016, consiguió establecer un récord mundial en la eficiencia de espectro inalámbrico del 5G. Demostró que utilizando un número de antenas masivas (*Massive MIMO*), para un sistema de comunicaciones inalámbrico, puede conseguir hasta 12 veces mayor eficiencia espectral en comparación con la tecnología actual 4G [20].

Esta gran aportación que las universidades realizaron, se llevó a cabo a través de LabVIEW para la creación de los prototipos de forma flexible. Implementado mediante una plataforma SDR, que contaba con el hardware PXI y 128 antenas en la estación base con un máximo de 12 clientes de una única antena. Realizando un sistema MIMO 12x128. Véase figura 11.



Fig. 11. Proyecto 5G universidades de Bristol y Lund [20]

La frecuencia portadora a la que realizaron la demostración fue de 3.5 GHz, dónde cada cliente compartía un canal de 20 MHz. Se realizaron complejos algoritmos de procesamiento de señal digital a través de la matriz de antenas [20].

Gracias a la dedicación de numerosos profesores y estudiantes, se consiguió dar un paso más para convencer de que el uso de MIMO Masivo (*Massive MIMO*) era la

clave para consolidar el 5G. Obteniendo tasas de 1.59 Gbps (Giga bits / segundo) en un canal de 20 MHz. Y una eficiencia espectral de 79.4 bit/s/Hz [20].

Este proyecto, desarrollado en la Universidad Carlos III, es un proyecto a pequeña escala en comparación con el que ha sido desarrollado en estas universidades. El objetivo de este trabajo es conseguir un funcionamiento documentado para facilitar la continuación del presente proyecto, como líneas a futuro. También se pretende que sirva de guía para el manejo y control del software LabVIEW y conseguir mejorar los prototipos existentes. Debido a la novedad del equipamiento en la Universidad Carlos III, se necesita de un periodo de pruebas para comprender con exactitud el funcionamiento de creación de prototipos.

Capítulo 3 : EQUIPAMIENTO IMPLICADO EN LA CREACIÓN DEL PROTOTIPO

En este proyecto se han visto implicados diferentes medios, que han sido necesarios para su desarrollo, como se puede observar en la figura 12. Y en la figura 13 se adjunta un esquema funcional para entender las interconexiones entre los diferentes dispositivos. Por lo que en este capítulo se presentarán los recursos hardware del laboratorio, donde forman parte: los 5 USRPs (*Universal Software Radio Peripheral*), plataforma PXIe, distribuidor de reloj, ordenador y osciloscopio.

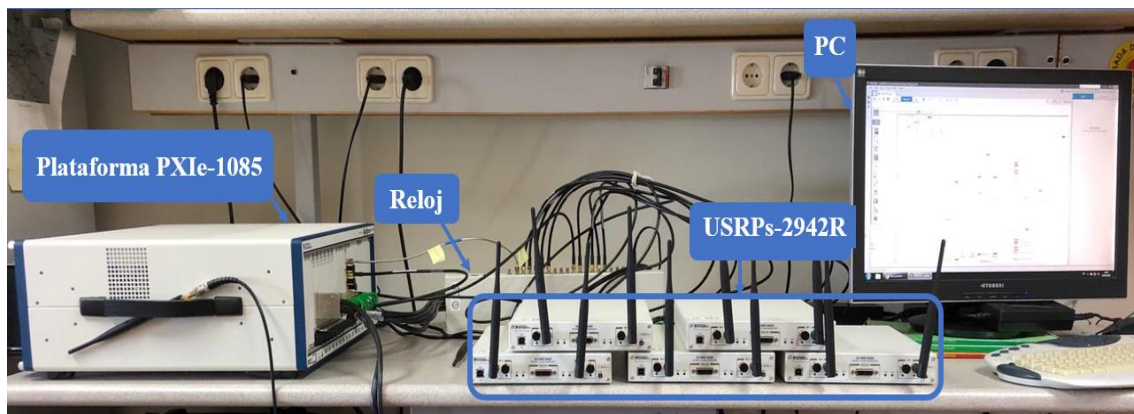


Fig. 13. Equipo funcional del laboratorio

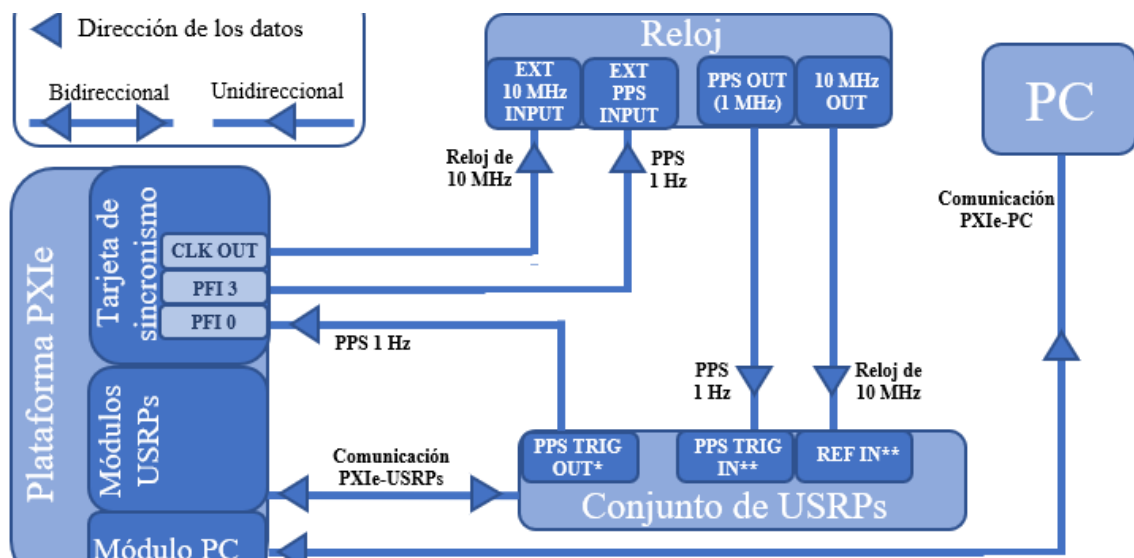


Fig. 12. Esquema de conexión hardware

En la Figura 13 se observa las conexiones entre los diferentes equipos, que en grandes rasgos se pueden resumir en:

- 1) Conexión entre el PC y la plataforma PXI
- 2) Conexión entre la plataforma PXI con los USRPs y el reloj (distribuidor de reloj).

Entonces la plataforma PXI se encarga de la conexión entre los USRPs y el ordenador, para que éste a través del software se puedan programar.

3.1. Dispositivo USRP – 2942R

El USRP (Universal Software Radio Peripheral), que como su nombre indica, es un transceptor periférico de comunicaciones radio por software universal. El cual funciona como dispositivo de Radio Definido por Software (SDR), que sirve para crear prototipos de sistemas de comunicaciones inalámbricas, mediante un software [21]. Es decir, un transceptor que a través de sus antenas envía o recibe señales de RF (Radiofrecuencia) y ofrecen una alta exactitud en sus resultados. Existe una amplia gama de USRPs que son comercializados por la empresa National Instruments. En este proyecto se ha empleado el modelo NI USRP-2942R. En la figura 14 se muestra dicho dispositivo.

Estos dispositivos se conectan con un PC, mediante la plataforma PXIe, para que puedan ser programados mediante un software, en este proyecto se usará LabVIEW, presentado anteriormente, aunque son compatibles con otros softwares como MATLAB. Este tipo específico de transceptores, los NI USRP-2942R, tienen dos radiocanales, el 0 y el 1, cada uno de dichos radiocanales posee la capacidad de un transmisor (TX1) y dos receptores (RX1/RX2). Como principales características [22]:

- 1) Tanto el receptor como el transmisor pueden trabajar en los rangos de frecuencia de entre 400 MHz hasta los 4.4 GHz.
- 2) Máxima potencia de salida de 20dBm y, de entrada -15dBm.

- 3) Rango de ganancia entre 0 y 31.5dB en el transmisor, y en el receptor de 0 y 37.5dB.
- 4) La figura de ruido máxima en la recepción es de 7dB.
- 5) Máximo ancho de banda que soporta de 40 MHz.
- 6) Máximo frecuencia de muestreo de 200 MS/s.

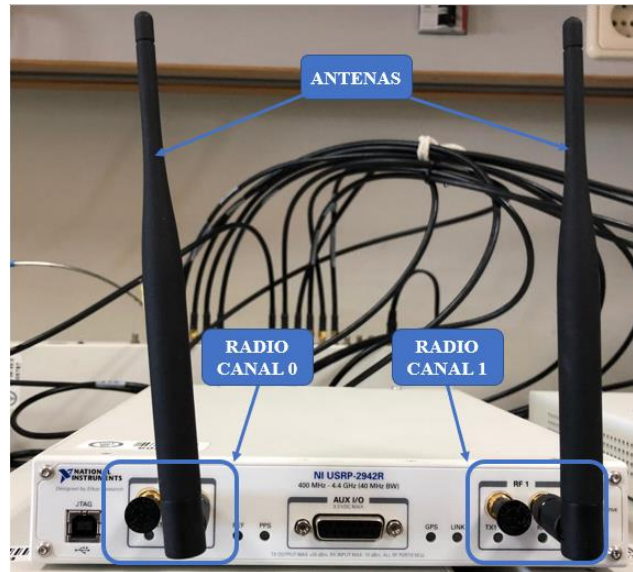


Fig. 14. Dispositivo NI USRP-2942R

El modelo de las antenas usadas en los USRPs es VERT2450, proporcionadas por National Instruments, son antenas verticales de doble banda: de 2.4-2.5 GHz y 4.9-5.9 GHz con una ganancia de 3 dBi [23].

Todas estas características hacen que estos dispositivos sean de gran precisión, y con un alto grado de adecuación a las necesidades de cada uno. Su uso principal es en las universidades o empresas de innovación. Puesto que son capaces de crear un prototipo de sistema de comunicaciones inalámbricas programables por el PC. Gracias a ello, se pueden estudiar dichas comunicaciones para conseguir optimizarlas, hacerlas más eficaces y conseguir mejores prestaciones antes de lanzarlas al mercado.

3.2.NI PXIe – 1085

Gracias a la plataforma o chasis PXI (*Pheripheral component interconnect eXtensions for Instrumentation*) se pueden producir prototipos con conexiones de alto rendimiento, permitiendo conectar varios USRPs, para que puedan trabajar de forma simultánea. Comercializada también por la empresa National Instruments, este chasis realiza las conexiones entre los diferentes módulos, brindando habilidades de temporización y sincronización [24]. A través del PXI se produce la conexión entre el PC y el resto del equipamiento. Siendo una pieza imprescindible para poder realizar prototipos de alto rendimiento a través del software. El modelo usado ha sido NI PXIe-1085, PXIe es un modelo express de PXI. En la figura 15 se muestra el PXIe implicado en desarrollo del proyecto.

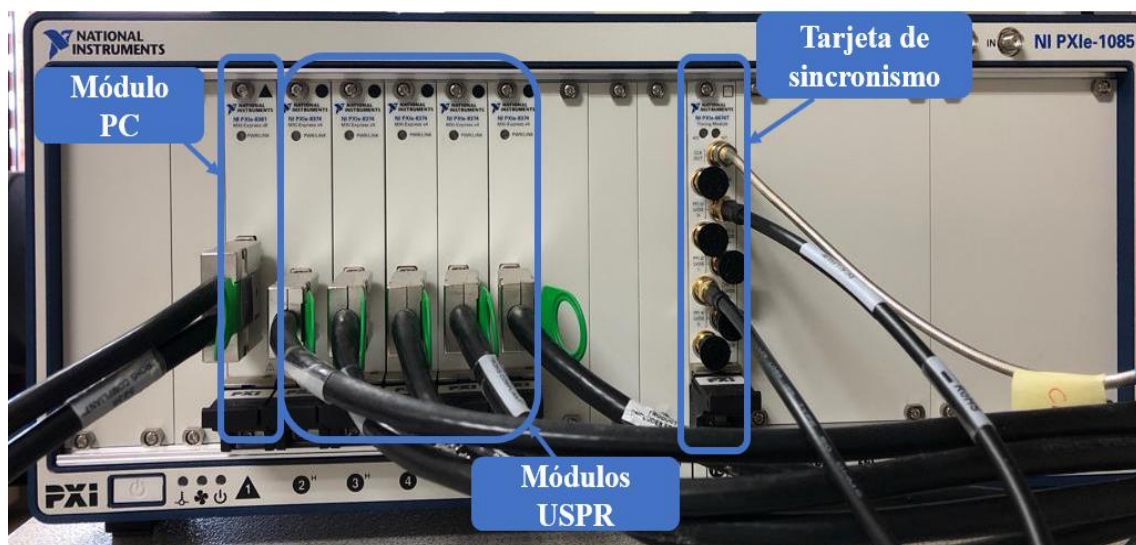


Fig. 15. Plataforma NI PXIe-1085

En la figura 15, se diferencian tres módulos usados para las conexiones hardware de los equipos:

- Módulo PC: Conecta el ordenador con el resto de los recursos.
- Módulos USRPs: Encargado de conectar cada uno de los dispositivos USRP al resto de los recursos.

- Tarjeta de sincronización (NI PXIe-6674T): Es un módulo que ofrece sincronismo externo. De la tarjeta sale un reloj de 10 MHz que va al distribuidor de reloj para que este pueda llevarlo a todos los USRPs.

3.3. OctoClock-G CDA-2990

El OctoClock es un distribuidor de reloj, y es el encargado de distribuir el reloj a todos los USRPs. El modelo usado es el OctoClock-G CDA-2990. Cuya función es que todos los USRP funcionen con la misma referencia y no estén desfasados. Puede ser interno o externo. Al poseer la tarjeta de sincronismo se ha configurado como externo, es decir, funciona solo de distribuidor. Si no se tuviera la tarjeta de sincronismo, se usaría de forma interna para que el distribuidor genere el reloj de forma automática [25].



Fig. 16. Distribuidor de reloj – Modelo OctoClock-G CDA-2990

El distribuidor de reloj tiene diferentes salidas y entradas, referenciadas con números para facilitar la explicación, como se ve en la figura 16. Las entradas 1 y 3 están conectadas con el chasis PXI, donde 1 coge el reloj de 10 MHz, proporcionado por la tarjeta de sincronismo. Y en 3 se coge el PPS (Pulso Por Segundo) de 1 Hz, proporcionado por un USRP. Por otro lado, las salidas 2 y 4 son los encargados de distribuir el reloj a todos los USRPs, desde 2 se salen los relojes de 10 MHz y desde 4 los PPS de 1MHz. El número 5 es la salida a la fuente de alimentación. Y con esto se consigue que los USRPs

estén sincronizados y funcionen conjuntamente, dando mejores servicios. Todas estas conexiones se verán más detalladas en el capítulo 4, apartado donde se configura el sincronismo.

3.4. Ordenador y osciloscopio

El Ordenador ha sido imprescindible para la programación software de los USRPs, a través de LabVIEW. Como característica a destacar, es el uso Windows 7, como sistema operativo, en el PC. Esto se debe por simplicidad, ya que la empresa National Instruments actualiza los paquetes de herramientas y drivers con los nuevos sistemas operativos, y al cambiar el sistema operativo a veces da fallos inesperados.

En cuanto al osciloscopio, cuyo modelo empleado ha sido DSO90604A *Digital Storage Oscilloscope*, ha servido como una herramienta muy útil para poder medir, comprobar, y asegurar los diferentes resultados y medidas realizadas en el prototipo de sistemas inalámbrico. En la figura 17 se muestra el osciloscopio utilizado.

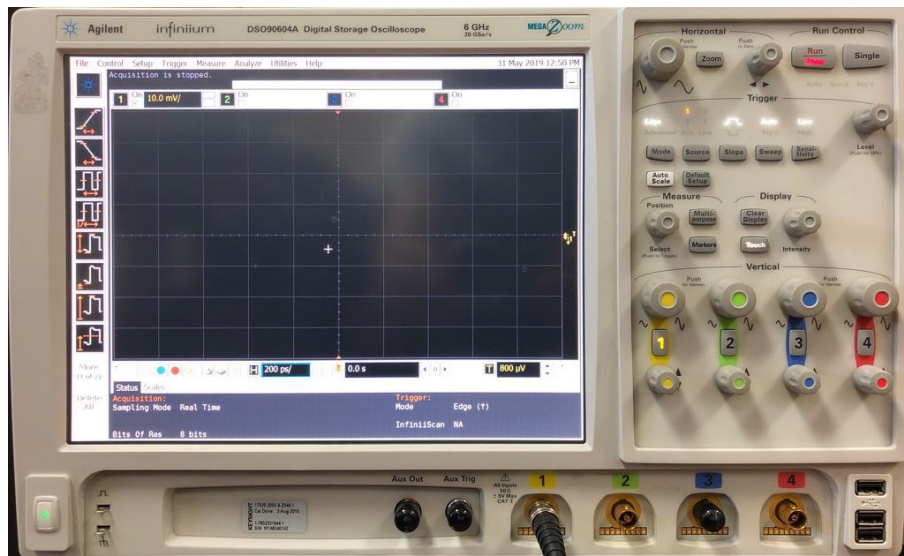


Fig. 17. Osciloscopio digital - DSO90604A Digital Storage Oscilloscope

Capítulo 4 : IMPLEMENTACIÓN Y MEDIDAS DE LOS PROTOTIPOS MULTIANTENA EN LABVIEW

Para la realización práctica del prototipo, ha sido necesaria la introducción de todos los conceptos teóricos mostrados en el capítulo 2, y conocer la funcionalidad del equipamiento necesario, en el capítulo 3. Este prototipo que se va a implementar es un sistema multiantena. El escenario real al que quiere imitar el prototipo presentado es la conexión inalámbrica entre un dispositivo móvil con una única antena y la estación base con múltiples antenas. Centrándose en el tráfico de subida (*Uplink*) se obtiene un sistema SIMO, pues consta de una única antena transmisora (dispositivo móvil) y múltiples antenas receptoras (estación base).

En este capítulo se presentan la implantación y diferentes mediciones del prototipo presentado. Primero se realizará una explicación de cómo se ha integrado el sincronismo dentro del sistema de comunicaciones inalámbrico. Y a continuación, se explicarán las dos implementaciones y medidas del prototipo multiantena.

4.1.Sincronismo

El sincronismo es el funcionamiento orquestado de todos los USRPs, para que no existan desfases a la hora del envío y recepción de señales. Para un mejor entendimiento de este concepto, el sincronismo ofrece el “punto de referencia” igual a todos los dispositivos USRPs, al tener todos estos dispositivos la misma referencia, van a funcionar de manera sincronizada. Dentro de este apartado son imprescindibles tanto el distribuidor de reloj como la tarjeta de sincronismo. Hay que tener claro el funcionamiento de esos dos dispositivos especialmente, aunque en la práctica todos son de vital importancia por su implicación al realizar las conexiones.

De modo que para tener el sincronismo en funcionamiento hay que realizar una serie de pasos, que se detallaran en este apartado, pero también hay que tener claro todos los recursos que cada dispositivo aporta a la función del sincronismo.

Una vez se ha entendido la utilidad de usar el sincronismo en el prototipo, se va a proceder a la explicación de las conexiones tanto hardware como software para su puesta en funcionamiento. Hay que diferenciar entre la conexión hardware que es la encargada de conectar físicamente, mediante cables, todos los dispositivos. Y la conexión software, mediante el PC, programar el envío de los datos por las salidas y entradas que se han conectado en el hardware. Ambas imprescindibles, ya que son dependientes entre ellas. Pues el hardware debe estar conectado para poder realizar la conexión software y, al contrario, igual. Antes de comenzar la explicación, hay que saber que en el sincronismo consta de un PPS, pulso por segundo, de 1 Hz y el reloj de 10MHz, que se desean llevar a cada USRP para conseguir el sincronismo.

4.1.1. Conexión hardware

En la figura 18 se muestran las conexiones hardware que influyen en el funcionamiento correcto del sincronismo. Dentro de dicha figura (figura 18) se diferencian distintos pasos de la conexión del sincronismo, para la explicación de cómo llega el sincronismo a todos los USRPs. Todas estas conexiones son unidireccionales.

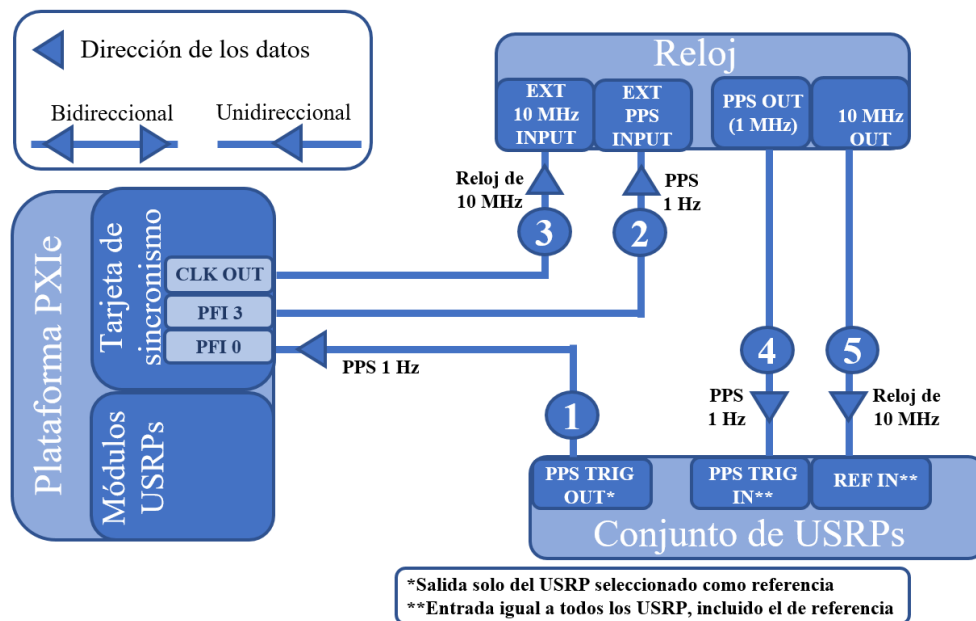


Fig. 18. Esquema conexiones hardware del sincronismo

1) Conexión entre USRP - PXIe:

Como se ve en la figura 18, este primer punto muestra la conexión entre uno de los USRPs y el chasis PXIe. Cabe destacar que la elección del USRP de referencia no es importante, en este proyecto se ha cogido el que más cerca quedaba del chasis PXIe por comodidad, pero no cambia nada.

La información que se quiere coger sale del USRP hacia el chasis PXIe. Cada uno de los USRPs tienen una salida llamada “PPS TRIG OUT”, de la cual sale un PPS (Pulso Por Segundo) de 1 Hz. Este pulso es el que se quiere coger y llevar a la tarjeta de sincronismo, que se encuentra en el chasis PXIe. En la figura 19, se puede ver el PPS medido con el osciloscopio de la conexión nº 1 que se muestra en la figura 18.

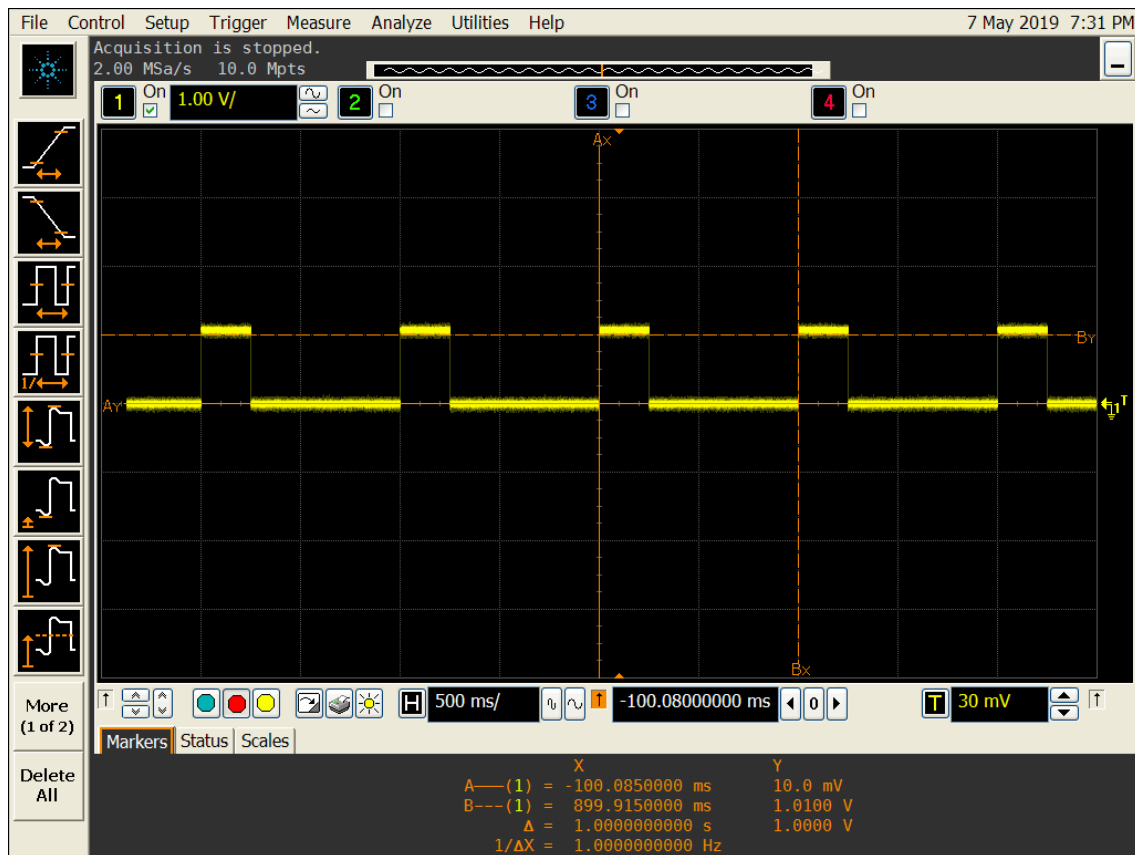


Fig. 19. PPS de 1 Hz, de USRP - PXIe

2) **Conexiones entre PXIe - Distribuidor de reloj:** es la conexión entre la tarjeta de sincronismo de la plataforma PXIe y el distribuidor de reloj, y se van a diferenciar dos conexiones (nº2 y nº3), ver figura 18:

2.1) Conexión que transporta desde la tarjeta de sincronismo (dentro del chasis PXIe) al distribuidor de reloj, el PPS (Pulso Por Segundo) de 1 Hz, que tiene su origen en el USRP de referencia seleccionado anteriormente. En la figura 20, se muestra el PPS transportado del PXI al distribuidor de reloj, medido con el osciloscopio. Es la conexión nº 2 que se muestra en la figura 18.

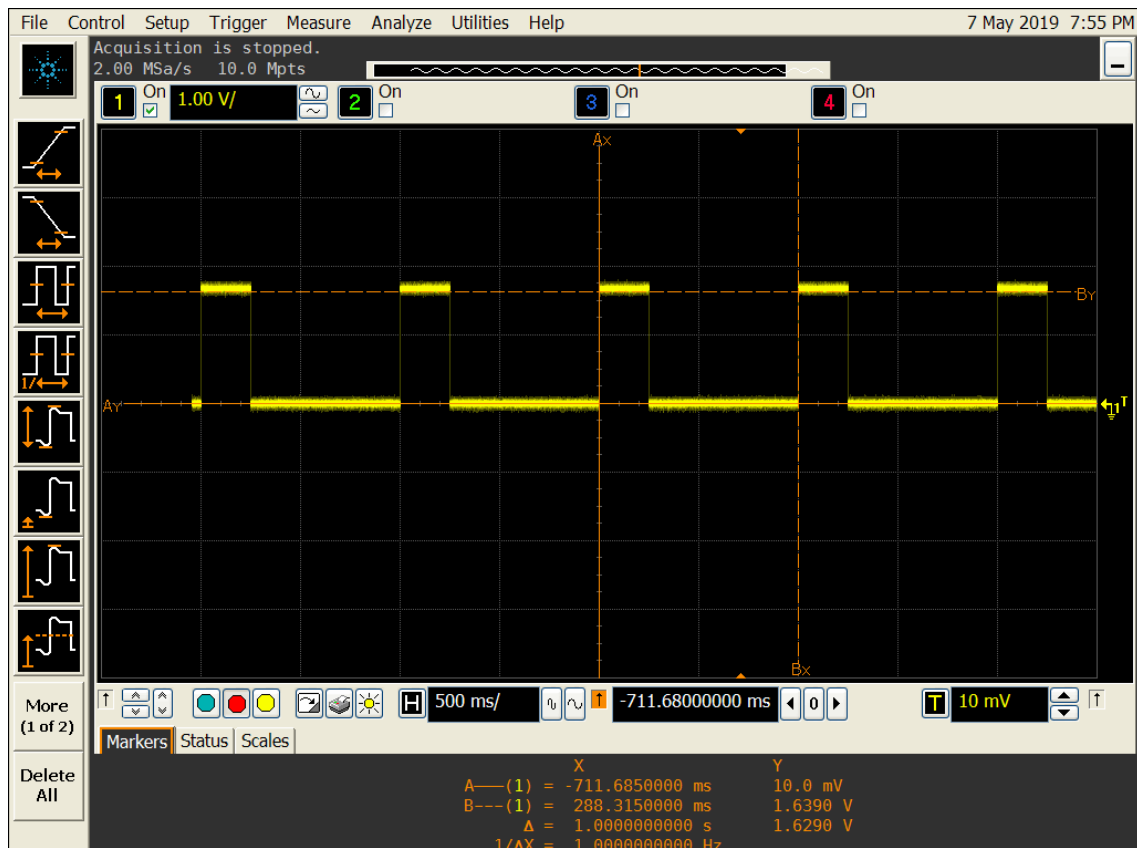


Fig. 20. PPS de 1 Hz, de PXIe – Distribuidor de reloj

2.2) Conexión que transporta el reloj de 10 MHz desde la tarjeta de sincronismo del PXIe al distribuidor de reloj. Este reloj de 10 MHz se origina desde la tarjeta de sincronismo que tiene instalada el chasis PXIe. En la figura 21, se muestra el reloj transportado del PXI al distribuidor de reloj, medido con el osciloscopio. Es la conexión nº 3 que se muestra en la figura 18.

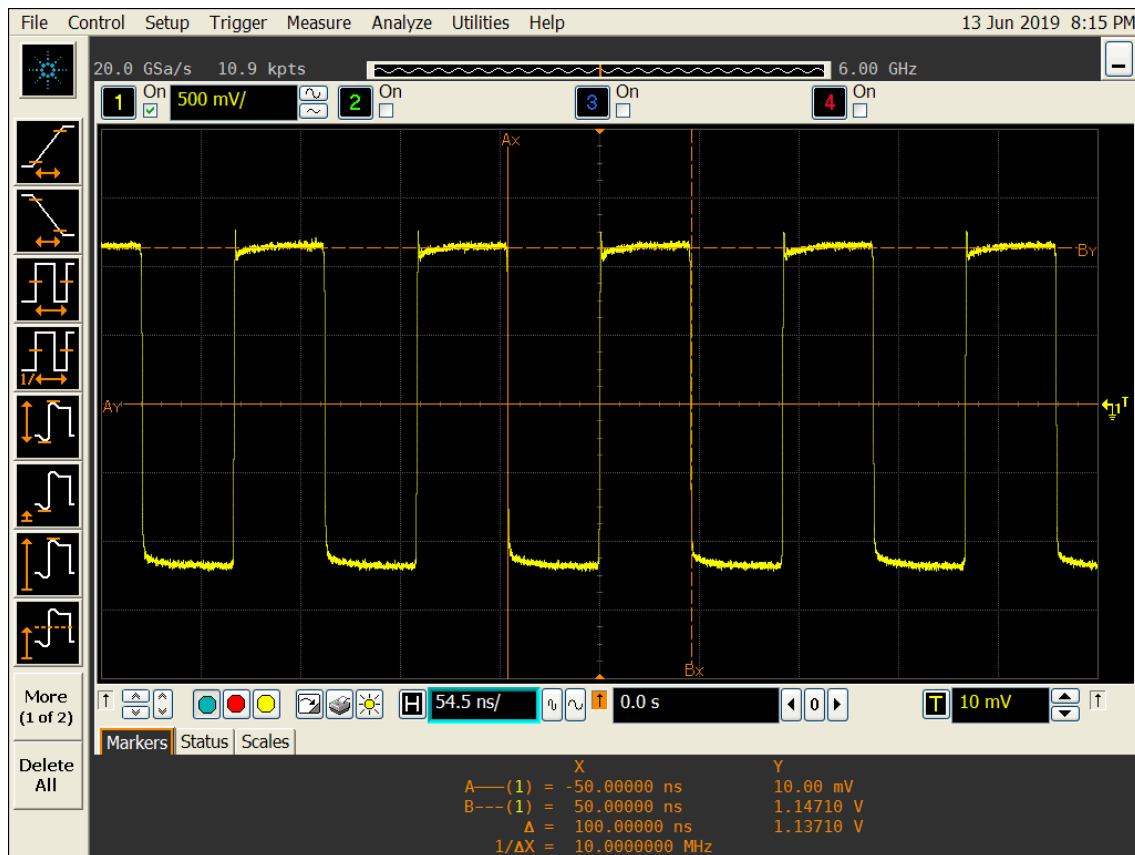


Fig. 21. Reloj de 10MHz, de PXIe – Distribuidor de reloj

3) **Conexiones entre Distribuidor de reloj - USRPs:** distribuye el reloj y el PPS a todos los USRPs, se diferencian dos conexiones (nº4 y nº5), ver figura 18:

3.1) Conexión que distribuye a cada USRP el PPS (Pulso Por Segundo) de 1 Hz. En la figura 22, se muestra el PPS transportado del distribuidor de reloj a cada USRP, medido con el osciloscopio. Es la conexión nº 4 que se muestra en la figura 18.

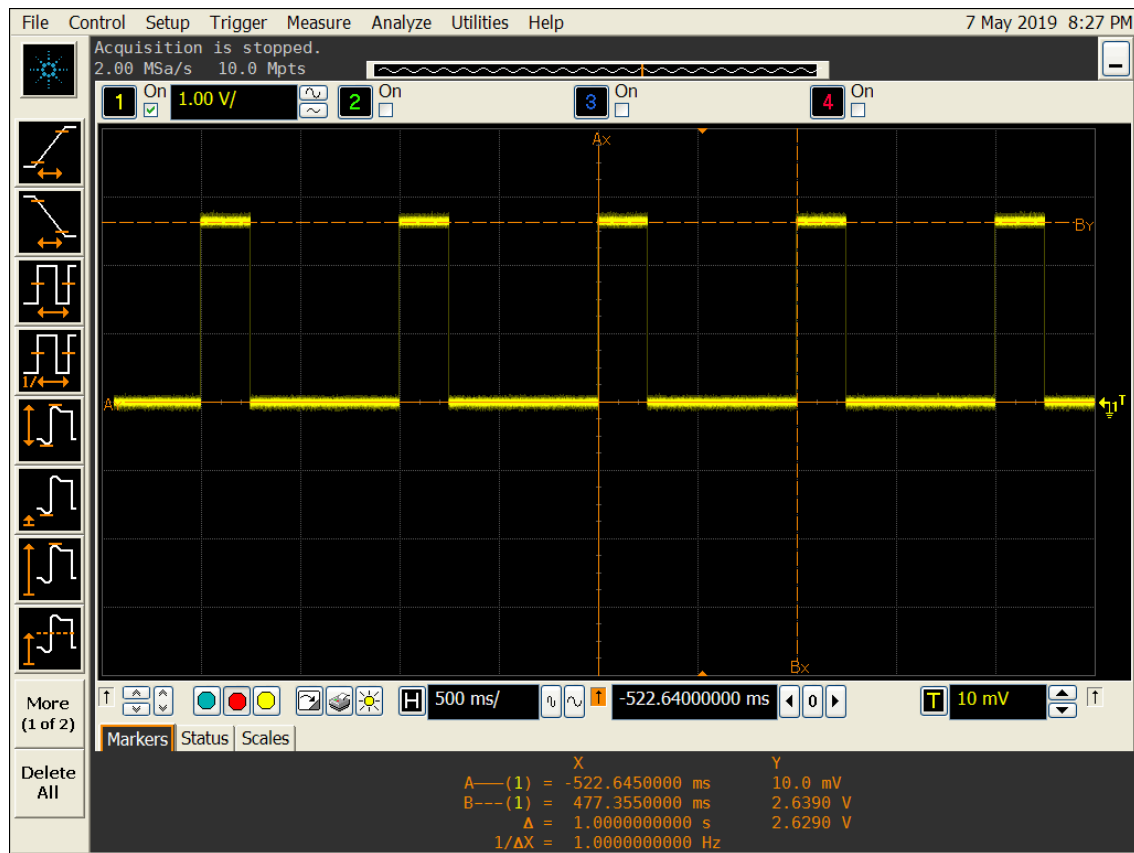


Fig. 22. PPS de 1 Hz, de Distribuidor de reloj - USRP

3.2) Conexión que distribuye a cada USRP el reloj de 10 MHz. En la figura 23, se muestra el reloj transportado del distribuidor de reloj a cada USRP, medido con el osciloscopio. Es la conexión n° 5 que se muestra en la figura 18.

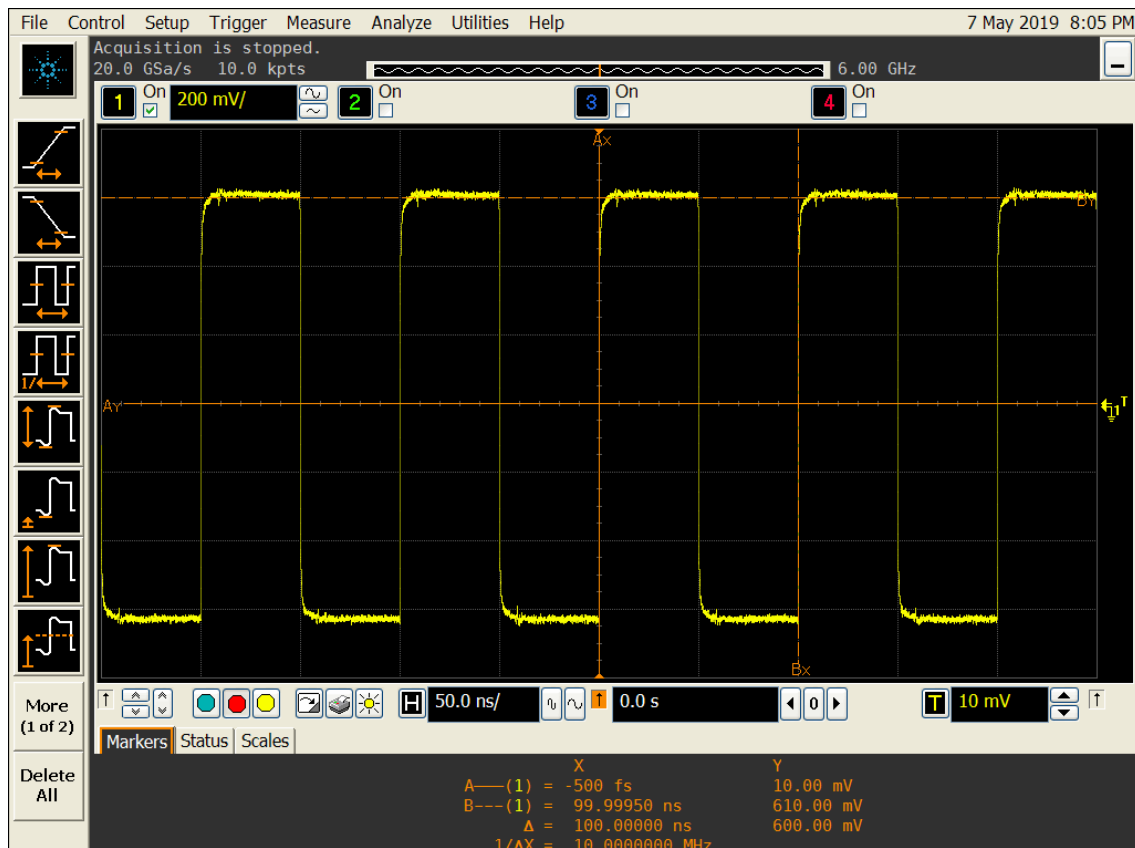


Fig. 23. Reloj de 10MHz, de Distribuidor de reloj - USRP

Una vez acabada y comprobada que la conexión del hardware es correcta. La conexión software es imprescindible, para que todos los USRPs reciban tanto el PPS de 1 Hz como el reloj de 10 MHz y quede el sincronismo en perfecto funcionamiento. Para conseguir las figuras 19, 20, 21, 22 y 23 se ha necesitado tener el software conectado, cuya conexión se explica a continuación.

4.1.2. Conexión software

Después de comprender y realizar la conexión hardware, se procede a la explicación detallada de la conexión software. En este apartado solo influye la tarjeta de sincronismo, ya que es la única que depende de la conexión software. Pues la tarjeta de sincronismo trabaja como un “puente” del PPS de 1 Hz y del reloj de 10 MHz. Donde a

través del software se enrutan los caminos deseados de los datos (reloj y PPS) para que entren por un pin y, salgan por otro pin, dentro de la tarjeta de sincronismo. Con la palabra “puente” hace referencia a el camino que han de pasar ambos datos (PPS y reloj) dentro de dicha tarjeta de sincronismo.

En la figura 24, se adjunta una imagen de la tarjeta de sincronismo integrada en el chasis PXIe, de donde se pondrá atención es los pines de entrada y salida para su conexión software. También serviría de ayuda fijarse en la figura 18, para la mejor visualización de las explicaciones de conexiones que hay que realizar.

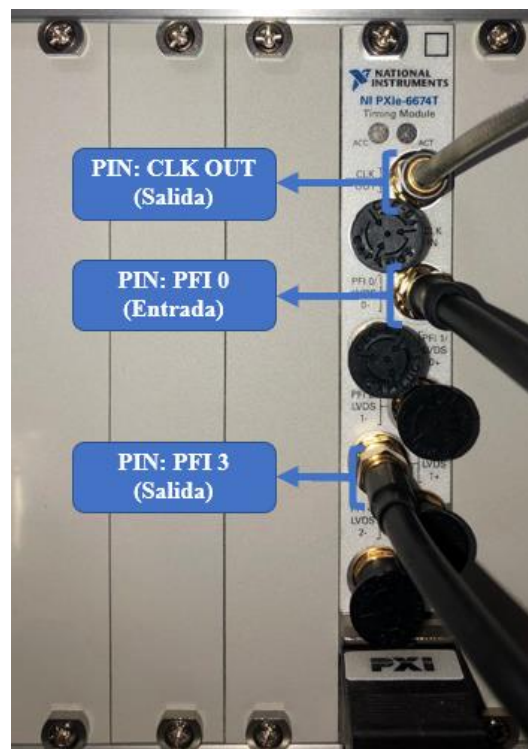


Fig. 24. Imagen tarjeta de sincronismo

Mirando las figuras 18 y 24, se va a explicar cómo se han enrutado los diferentes caminos dentro de la tarjeta de sincronización, para conseguir llevar el sincronismo a todos los USRPs.

1) Conexión del PPS de 1 Hz:

Como se ha visto en el apartado del hardware, el PPS de 1 Hz sale del USRP, de referencia, hacia la tarjeta de sincronismo. Y, después de la tarjeta de sincronismo hacia el distribuidor. En la conexión software se tiene que enrutar ese camino. Viendo la figura 18, el enrutamiento del camino será **PFI0-PFI3**, siendo PFI0 el pin de entrada a la tarjeta de sincronismo, y PFI3 el de salida. Los pines no son determinantes, se puede escoger cualquiera, siempre y cuando la decisión sea consecuente con la conexión hardware.

2) Conexión del reloj de 10 MHz:

De igual manera para el reloj de 10 MHz. La diferencia es que este se crea directamente desde la tarjeta de sincronismo, pero igualmente hay que realizar el enrutado del camino. Viendo la figura 18 la salida deseada es ClkOut, pero la entrada no se ve en dicha figura, pues el reloj 10MHz sale de la tarjeta de sincronismo directamente, por lo que la entrada esta internamente en la tarjeta de sincronismo, siendo **PXI_Clk10**. El enrutamiento final del camino será de **PXI_Clk10-ClkOut**. En este caso los pines sí que son determinantes, no se pueden cambiar. Entendiendo los pines que se han de conectar, ahora solo falta ver cómo se lleva a cabo dicha conexión mediante el ordenador.

En la figura 25, se puede ver como se realiza el enrutamiento de los pines seleccionados, a través del software NI MAX. National Instruments, la empresa que comercializa tanto LabVIEW como todos los dispositivos que están implicados en este proyecto, ha creado diferentes espacios software dentro del ecosistema LabVIEW, para la separación de sus funciones. NI MAX, da acceso a aquellos dispositivos hardware que están conectados a tu ordenador, pudiendo ver las características de cada uno de ellos, como el estado de su conexión (apagado o encendido). Mediante NI MAX, como se observa en la figura 25, también se pueden realizar los enrutamientos necesarios.

Después de abrir la página de NI MAX (ver figura 25), se procede a abrir la pestaña de dispositivos e interfaces (*Devices and Interfaces*), donde se cliquea dentro del dispositivo NI PXIe-6674T “Dev2”, que es la tarjeta de sincronismo. Una vez dentro de las características del dispositivo, se entra al panel de pruebas (*Test Panels*), donde se añaden los caminos para enrutarlos como se desee (PFI0-PFI3 y PXI_Clk10-ClkOut), explicados anteriormente. El orden de introducir los caminos no es determinante.

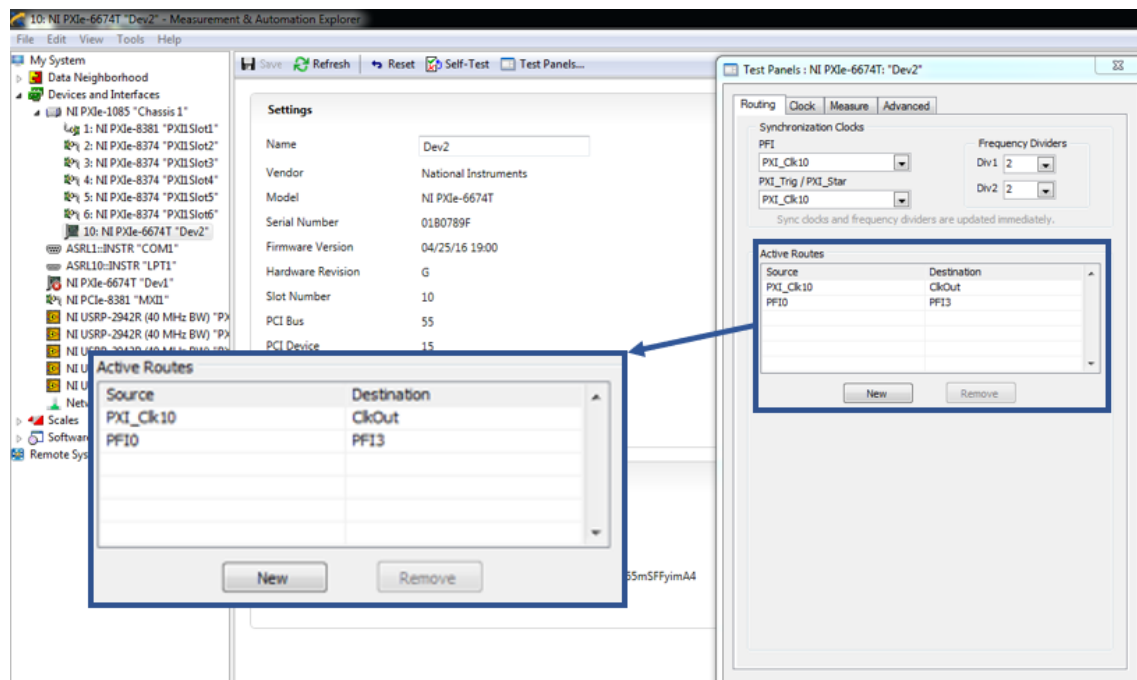


Fig. 25. Conexión sincronismo mediante NI MAX en PC

Por último, cabe destacar una última puntualización para que el sincronismo funcione. En la figura 26, se muestra la pantalla del ordenador con los *threshold* (límite de voltaje) de cada uno de los pines que contiene la tarjeta de sincronismo. Al tener conectados diferentes tipos de equipos entre sí, cada uno de ellos con especificaciones técnicas diferentes, esto puede causar una variación del *threshold*. En este proyecto, se ha dado este caso para el pin PFI0, que es el proveniente del USRP de referencia y entra en la tarjeta de sincronismo. Por lo que se ha medido el rango de *threshold* compatible con la conexión, siendo de 0 a 0.9664V. Como se demuestra en la figura 27, el PPS que sale

del USRP y entra por el pin PFI0, tiene un valor máximo de 1V, por lo que el *threshold* debe ser menor.

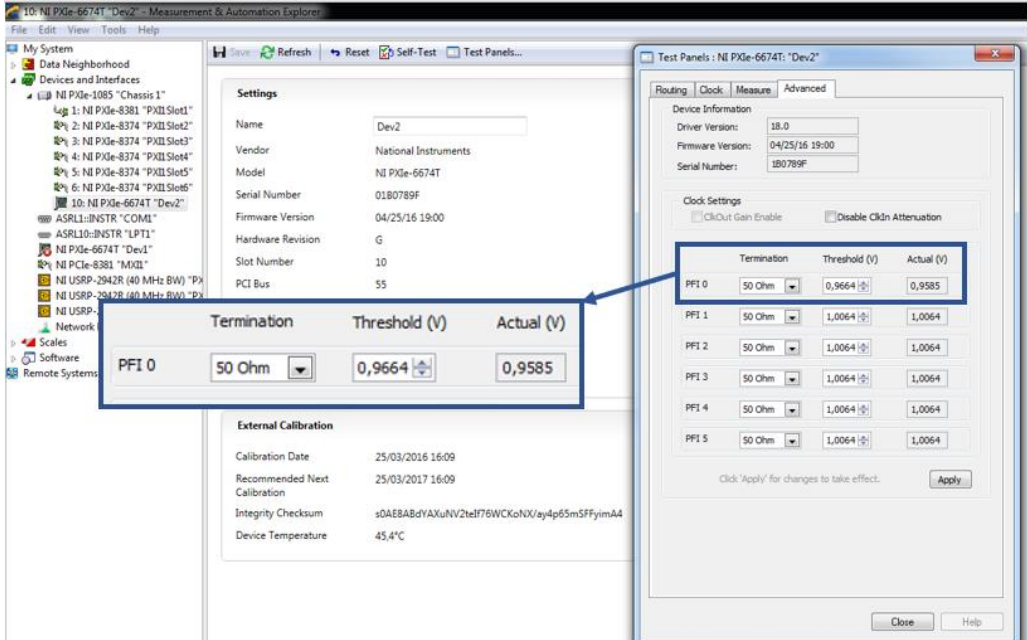


Fig. 27. Threshold del pin PFI0 mediante NI MAX en PC

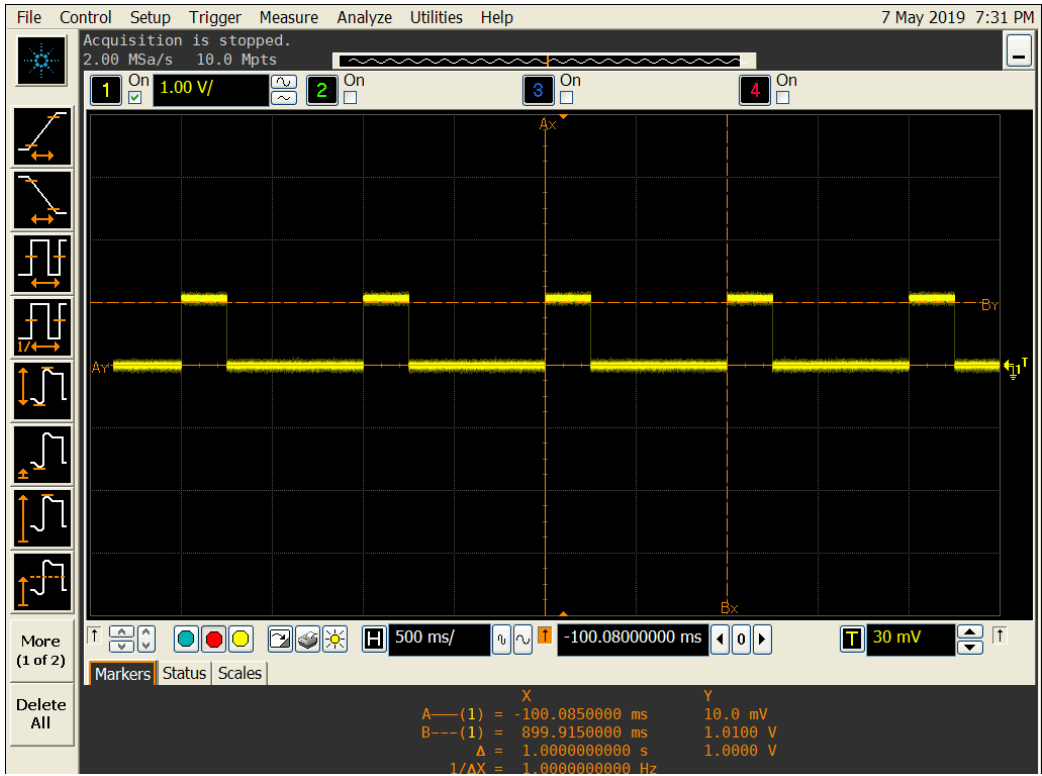


Fig. 26. Salida PPS del USRP de referencia

Acabada la conexión software y hardware del sincronismo, comienza las implementaciones del prototipo de sistemas de comunicaciones inalámbrica.

4.2. Calibración del seno

Teniendo el sincronismo en funcionamiento, se comenzará con la primera implementación y medición de nuestro sistema de comunicaciones inalámbricas, llamada la calibración del seno. En esta implementación del prototipo multiantena diseñado, se presenta con una antena transmisora y ocho antenas receptoras. La funcionalidad de la calibración del seno es el envío desde la antena transmisora de una señal seno, que va a ser recibida por las ocho antenas receptoras. Este apartado se va a dividir en dos partes, explicando en una primera parte la implementación del prototipo en LabVIEW, donde se subdividirá en transmisor y receptor; y en una segunda parte las mediciones realizadas del prototipo multiantena.

Hay que destacar que la programación en bloques, como es el caso de LabVIEW, permite una sencilla visualización de la implementación. Gracias a su gran variedad de bloques preprogramados, hacen que la realización del sistema se simplifique en cuanto a complejidad visual del sistema a programar. En este proyecto, la programación mediante LabVIEW se ha desarrollado en dos pasos, primero la implementación del diagrama de bloques y a continuación, especificar los valores reales a los que se quiere realizar dicha comunicación inalámbrica.

Como aclaración previa a la implementación, cabe mencionar la nomenclatura utilizada dentro del software, para referirse a los USRPs. LabVIEW, a través NI MAX, detecta cuantos USRPs están conectados (encendidos) en el sistema. Por lo que, dentro del panel de características, cuando se quiere rellenar el número de dispositivos implicados, automáticamente nombra a cada USRP como RIO (RIO0, RIO1, RIO2, ...). Y cada RIO, puede tener dos transmisores o dos receptores funcionando a la vez, que se programarán en el número de canales habilitados (*Enabled channels*).

4.2.1. Implementación de la calibración del seno en LabVIEW

4.2.1.1. Transmisión

En la transmisión de este sistema de comunicaciones inalámbricas, solo existe una antena transmisora, imitando la transmisión de un dispositivo móvil con una única antena. Teniendo que realizar la programación mediante bloques de la transmisión de una señal seno del prototipo diseñado. A continuación, se adjuntan las figuras del diagrama de bloques, en LabVIEW, de cómo se ha llevado a cabo la programación del transmisor (Tx). Para una explicación más detallada y sencilla del transmisor, se ha decidido dividir dicho diagrama en tres partes (figuras 28, 29 y 30). En el anexo D, se encuentra el circuito completo, ver apartado D.1.1

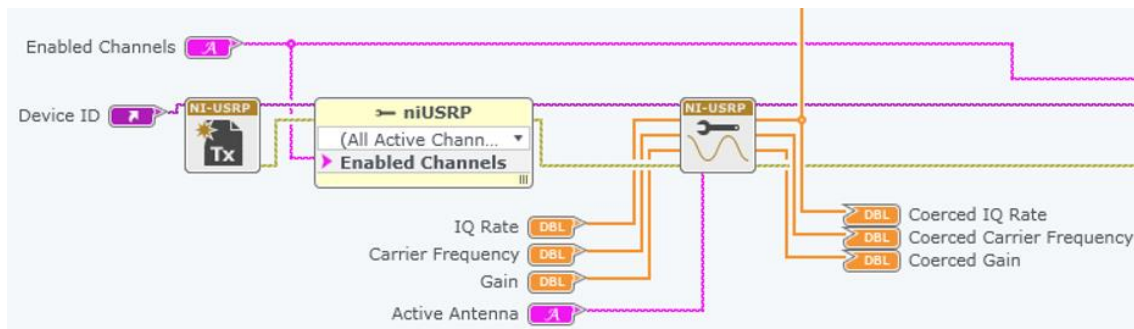


Fig. 28. Parte 1 diagrama de bloques Tx Calibración del seno

1) En esta parte del diagrama de bloques (figura 28) se inicializa el USRP (*Device ID*) como transmisor, añadiendo todas las configuraciones de parámetros que se desea tener en la transmisión:

- Radiocanales habilitados del USRP (*Enabled channels*), cada USRP tiene dos radiocanales posibles para activar.
- Activar las antenas o la antena (*Active Antenna*), como cada radiocanal se subdivide en dos canales, aquí se activarían esos canales, que son directamente la salida de la antena por la que se transmitirá.

- Por otro lado, las muestras por segundo (*IQ Rate*), la frecuencia portadora (*Carrier frequency* en [Hz]) y la ganancia aplicada a la señal de radiofrecuencia (*Gain* en [dB]). Estas tres últimas configuraciones, van a estar limitadas por las especificaciones técnicas del dispositivo, por eso, aparecen como salidas en la configuración (*Coerced*), porque finalmente, se forzará automáticamente el valor introducido al valor soportado por los dispositivos, en el caso de que este valor sea muy alto.

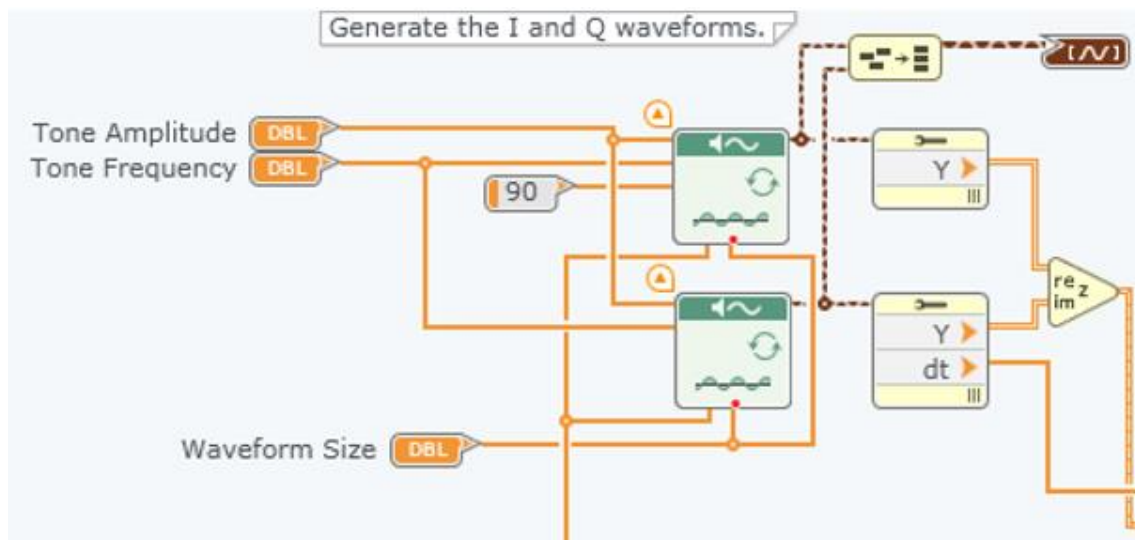


Fig. 29. Parte 2 diagrama de bloques Tx Calibración del seno

2) Aquí (figura 29) se crea la señal que se desea transmitir, por lo que para formar una exponencial se creará un seno y un coseno:

- Primero se introducirán los valores de amplitud (*Tone Amplitude*), tamaño (*Waveform Size*), frecuencia (*Tone Frequency*) y se ajusta un desfase de 90° (en uno de los bloques de configuración seno), cuya función es crear un coseno (coseno = seno $\pm 90^\circ$), para formar la exponencial.
- En la creación de la señal se necesita tener las mismas muestras por segundo (*IQ Rate*) configuradas en el paso 1. Se cogen los valores que

se van a necesitar posteriormente que son la `dt` y `Y`. Configura dichos valores tipo lectura de datos, para luego usarlos. Se llama, `Y` al valor en complejos de la señal formada y, `dt` a la diferencia de tiempos entre los valores del array `Y`.

- La parte superior donde parece un cuadro de color marron con dos cables conectados, no tiene valor funcional, sólo produce la gráfica de la señal transmitida, que será mostrada en el apartado de medidas.

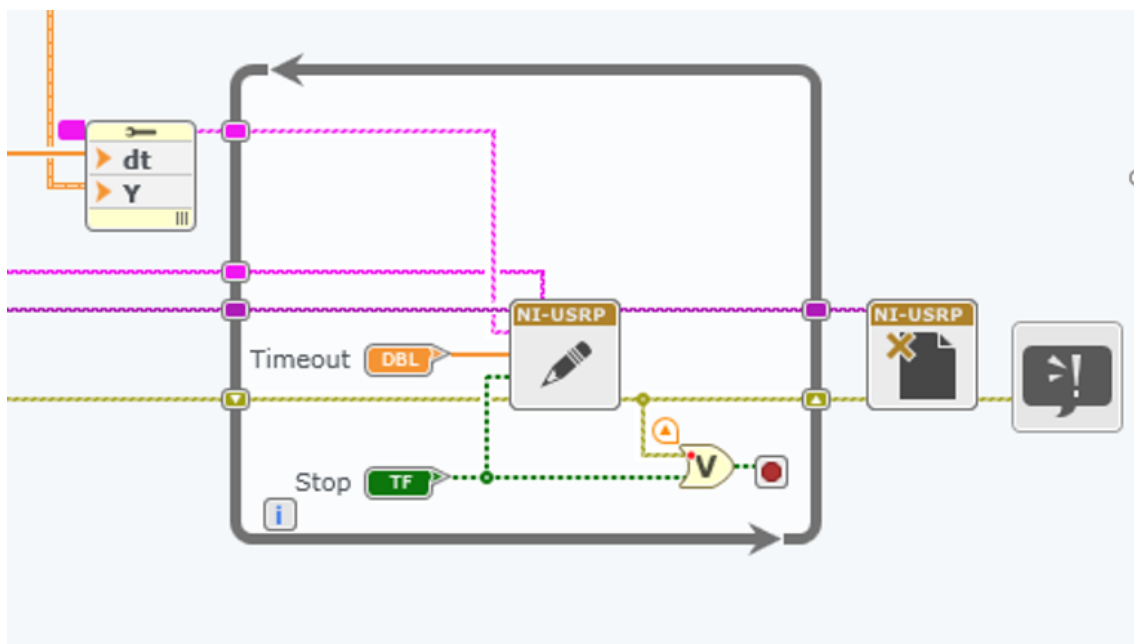


Fig. 30. Parte 3 diagrama de bloques Tx Calibración del seno

3) En esta parte del diagrama de bloques (figura 30) se termina con la programación del transmisor. Aquí se juntan en un bucle (*loop*), la señal seno que se ha creado en el paso 2, con los valores configurados en el paso 1.

- De la señal seno creada en el paso 2 se van a coger los valores, anteriormente leídos, de la `dt` y `Y`, necesarios para realizar la escritura de los datos a transmitir.

Finalmente, ya se tiene escrita la configuración de nuestro USRP como transmisor. Cuando se sale del bucle es para cerrar la sesión, esto ocurre si se produce algún error o cuando se pulsa el botón de parar ejecución (*stop*), donde se cierra la sesión para el dispositivo USRP, y se aborta la simulación automáticamente, dejando de enviar la señal que estaba transmitiendo.

Hasta aquí, ya está acabada la primera parte, la programación del diagrama de bloques del transmisor, ahora falta la segunda parte, dar valores reales. A continuación, en la figura 31 se puede ver el panel con las características reales que se han dado a la señal transmisora. Pues en la explicación del diagrama de bloques, se implementan en el circuito los valores que se quieren programar (figuras 28, 29 y 30) y, ahora se introducirá su valor real.

Device ID RIO1	Waveform Size 500	IQ Rate 1M	Coerced IQ Rate 1M
Active Antenna TX1	Tone Frequency 10k	Carrier Frequency 2,45G	Coerced Carrier Frequency 2,45G
Enabled Channels 1	Tone Amplitude 0,707	Gain 10	Coerced Gain 10
	Timeout 10		

Fig. 31. Panel de características Tx Calibración del seno

Por último, en la figura 31, se ajustan los valores específicos, de la configuración programada anteriormente, a los que se desea realizar la transmisión, en este caso los valores dados han sido:

- Dispositivo ID (*Device ID*): RIO 1.
- Antena activa (*Active Antenna*): TX1 (antena activada del radiocanal).

- Canales habilitados (*Enabled channels*): 1 (radiocanal 1 activado).
- Tamaño de la onda (*Waveform Size*): 500.
- Frecuencia onda (*Tone Frequency*): 10 KHz, la banda de frecuencia.
- Amplitud onda (*Tone Amplitude*): 0.707V.
- Muestras por segundo (*IQ Rate*): 1 MM/s (MegaMuestras por segundo)
- Frecuencia portadora (*Carrier frequency*): 2.45 GHz.
- Ganancias (*Gain*): 10dB.

Dados unos valores reales específicos ya se tiene la transmisión de la señal seno totalmente configurada para ser enviada. En cuanto a los valores elegidos, hay que destacar las muestras por segundo, hay que tener especial cuidado con no introducir valores muy altos, pues LabVIEW tiene un máximo de 2 MM/s. Aun así, la carga computacional es muy grande si se elevan a un número cercano a 2MM/s, por eso se ha escogido un número razonablemente alto. La frecuencia portadora, se ha elegido por las características de las antenas (doble banda dual, una de ellas 2.4-2.5 GHz), descritas en el capítulo 3.

4.2.1.2.Recepción

En la recepción de la calibración del seno del prototipo del proyecto, existen 8 antenas que están recibiendo la señal seno transmitida. Esta recepción con 8 antenas del prototipo imita una estación base desde la cual se recibe la señal de un dispositivo móvil, con una sola antena, que es el transmisor programado en el apartado anterior. Al igual que en la transmisión, los USRPs receptores han sido programados mediante LabVIEW. En las figuras 32 y 33 se muestra su diagrama de bloque programado, se han necesitado varias figuras para facilitar la visualización debido a su gran dimensión. Además, se ha dividido de forma óptima para poder explicar las diferentes partes, que han sido programadas, igual que se ha hecho en el transmisor. En la recepción, como es de esperar,

hay una parte menos, pues aquí no se crea ninguna señal. En el anexo D, se encuentra el circuito completo, ver apartado D.1.2

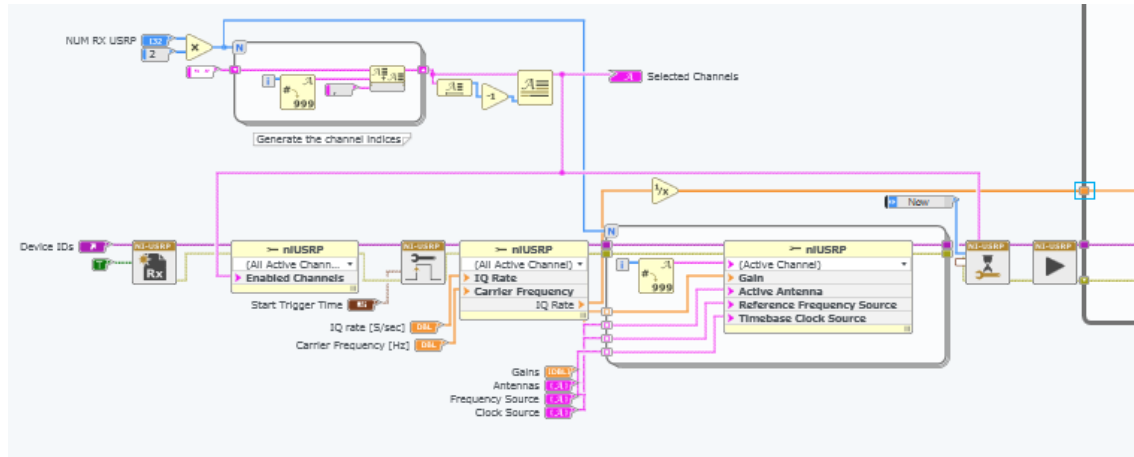


Fig. 32. Parte 1 diagrama de bloques Rx Calibración del seno

- 1) En una primera parte del diagrama de bloques, figura 32, se inicializa el USRP como receptor, añadiendo los parámetros que se necesitan para dicha recepción. En este caso es un poco más complejo que en transmisión, porque se utilizan 4 USRPs (*Device IDs*), con 2 antenas cada uno, recibiendo la señal al mismo tiempo. Se explicará en los siguientes puntos que parámetros son necesarios para su funcionamiento:

- Canales habilitados de los USRPs (*Selected Channels*), a través de una pequeña función donde se introduce el número de USRPs (*NUM RX USRP*), se calcula automáticamente el número de canales a usar, que es necesario saber. Esta función supone que cada USRP va a funcionar en sus dos radiocanales.
- Por otro lado, hay que tener en cuenta los siguientes parámetros: las muestras por segundo (*IQ Rate*); la frecuencia portadora (*Carrier frequency* en [Hz]); las ganancias aplicadas a las señales de radiofrecuencia (*Gains* en [dB]); la antena que se activará en cada

radiocanal (*Antennas*); y por ultimo las fuentes de frecuencia y reloj (*Frequency Source* y *Clock Source*).

- Aquí, al estar implicada más de una antena, hay que activar el trigger, para la sincronización de las antenas, con un valor inicial.

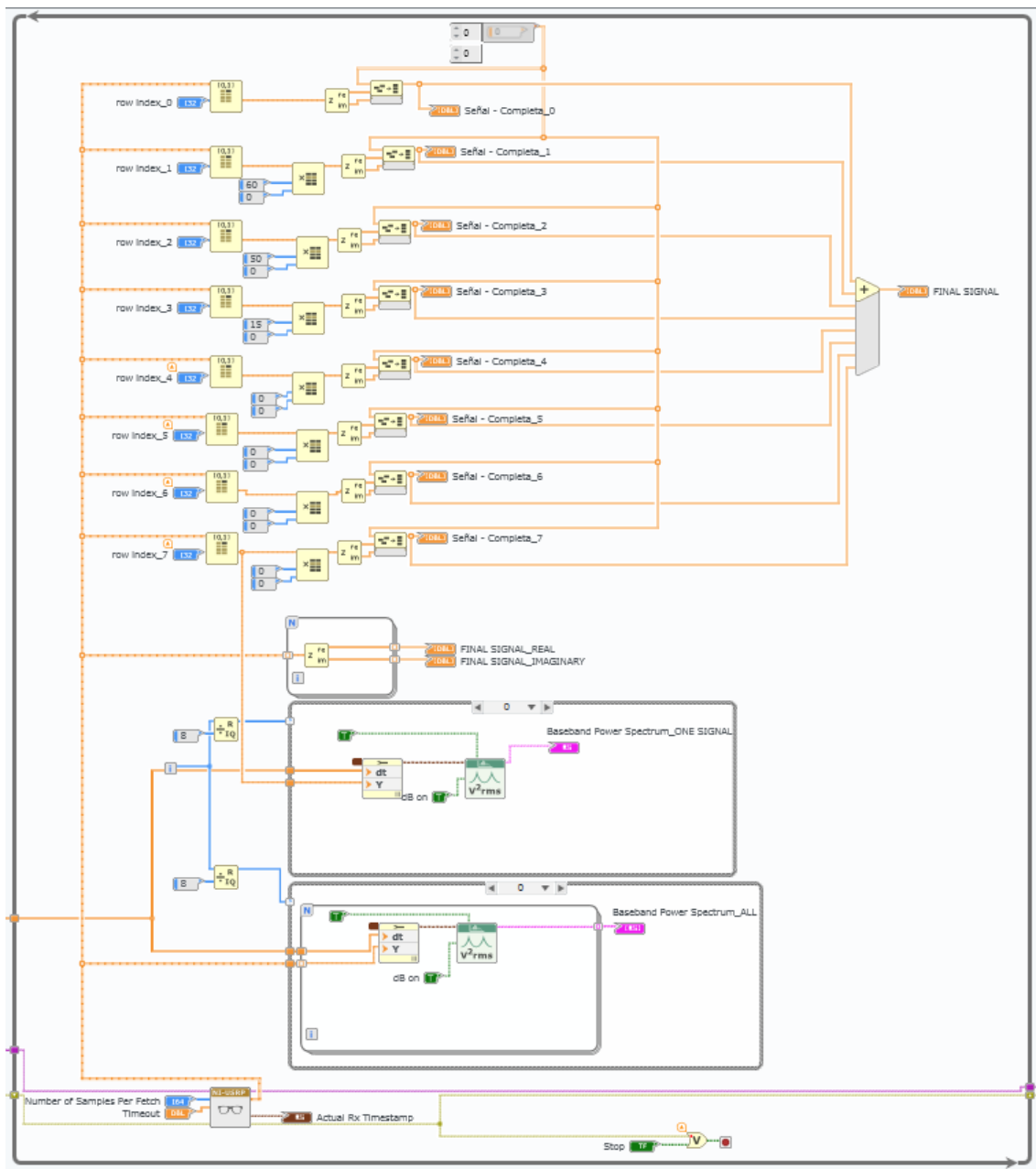


Fig. 33. Parte 2 diagrama de bloques Rx Calibración del seno

- 2) En esta segunda parte, en la figura 33, ya se tienen configurados todos los parámetros necesarios para la recepción. Ahora se entra en un bucle (loop), donde:

- La única parte funcional es la parte inferior, que es donde se extraen todos los datos ofrecidos anteriormente, y ya se tienen los USRPs configurados como receptores. Los únicos valores nuevos que entran son, el número de muestras extraídas (*Number of Samples Per Fetch*) y, el tiempo de salida (*timeout*).
- La parte superior, que es más extensa, su función es dibujar las gráficas que se verán en el siguiente apartado, medición de la calibración del seno.
- Al igual que en el transmisor, se ha creado un botón de parar (*stop*), para poder parar la simulación en cualquier momento que se desee.

Finalmente, ya se ha escrito la configuración de nuestro USRP como receptor. Cuando se sale del bucle es para cerrar la sesión, esto ocurre si se produce algún error o cuando se pulsa el botón de parar ejecución (*stop*), donde se cierra la sesión para el dispositivo USRP, y se aborta la simulación automáticamente, dejando de recibir.

Hasta aquí ya estaría acabado el primer paso, la programación del diagrama de bloques del receptor, ahora falta la segunda parte, dar valores reales. A continuación, en la figura 34 se pueden ver las características con las que se compuso el transmisor.

The screenshot shows a software interface for Rx Calibration. The settings are as follows:

- Number of Samples Per Fetch:** 500
- Timeout:** 10
- Device IDs:** RIO0;RIO4;RIO2;RIO3
- NUM RX USRP:** 4
- Selected Channels:** 0,1,2,3,4,5,6,7
- Actual Rx Timestamp:** whole seconds: 52, fractional seconds: 0.701
- Start Trigger Time:** whole seconds: 0, fractional seconds: 0.1
- IQ rate [S/sec]:** 500k
- Carrier Frequency [Hz]:** 2.45G
- Stop button:** A red button labeled "Stop".
- Frequency Source:** A column of 8 dropdown menus, all set to "RefIn".
- Clock Source:** A column of 8 dropdown menus, all set to "PpsIn".
- Antennas:** A column of 8 dropdown menus, all set to "RX2".
- Gains:** A column of 8 spinners, all set to 10.

Fig. 34. Panel de características Rx Calibración del seno

Por último, en la figura 34, se ajustan los valores específicos a los que se desea realizar la recepción, observando, que, alguno de los valores exigidos, tienen que coincidir con los valores que se han programado en la transmisión. Como, por ejemplo, la frecuencia de portadora (*carrier frequency*). Pues es imprescindible tener la misma frecuencia portadora para recibir la señal que se está transmitiendo. Los valores específicos que se han dado para la recepción son:

- Dispositivo IDs (*Device IDs*): RIO0; RIO2; RIO3; RIO4. (Hay 4 USRPs funcionando a la vez)
- Número de USRP (NUM RX USRP): 4.

- Canales habilitados (*Enabled channels*): 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 (ocho radiocanales activados), esta parte se rellena automática en función del número de USRPs (NUM RX USRP) y dispositivos IDs (*Device IDs*) que se pongan.
- Antena activa (*Active Antenna*): RX2 (antena del radiocanal activada).
- Frecuencia portadora (*Carrier frequency*): 2.45 GHz, igual que en transmisión.
- Muestras por segundo (*IQ Rate*): 500 KM/s (MegaMuestras por segundo). Menor que en Tx, por el uso de 4 USRPs a la vez. Muchos datos ejecutando a la vez, si no se baja este valor, puede dar fallo o no ejecutarse, por problemas de operación computacional.
- Ganancias (*Gain*): 10dB.
- Frecuencia y Reloj (*Frequency y Clock Source*): Se mete valor por defecto dentro del circuito, por lo que solo hay que poner RefIn, en frecuencia, y PpsIn, en reloj.
- Número de muestras extraídas (*Number of Samples Per Fetch*): 500, son las muestras que se cogen para dibujar las gráficas de las señales recibidas en tiempo.
- Start trigger Time, inicializa el reloj del sincronismo.

Dados unos valores reales específicos ya se tiene la recepción configurada para poder recibir la señal seno transmitida. Llegado a este punto, ya está el prototipo totalmente listo y se entiende tanto su programación, como el valor de sus parámetros. Ahora, se va a comenzar la simulación activando el transmisor, que envía la señal seno, y la recepción para que las 8 antenas reciban dicha señal. A continuación, se procede a la medición del prototipo en la calibración del seno, donde se adjuntarán diferentes tipos de gráficas, que se han obtenido.

4.2.2. Medición de la calibración del seno

Una vez programados y conocidos todos los valores del prototipo de sistema de comunicaciones inalámbricas, se va a proceder a la medición de los datos. En este apartado, se va a ejecutar el código de la recepción y transmisión, y se aportarán las figuras con los resultados obtenidos, en gráficas. Para poder así hacer una medición en la recepción de la señal seno, enviada por el transmisor, a las ocho antenas receptoras. Se explicará todo ajuste necesario a las medidas para mejorar la comunicación. Y es en el siguiente capítulo donde se realizará el análisis de las medidas.

En la figura 35, se muestra la señal transmitida. Esta señal es la que se ha programado en la transmisión y será enviada por una de las antenas de un USRP. Cuyas características han sido establecidas en el apartado de transmisión.

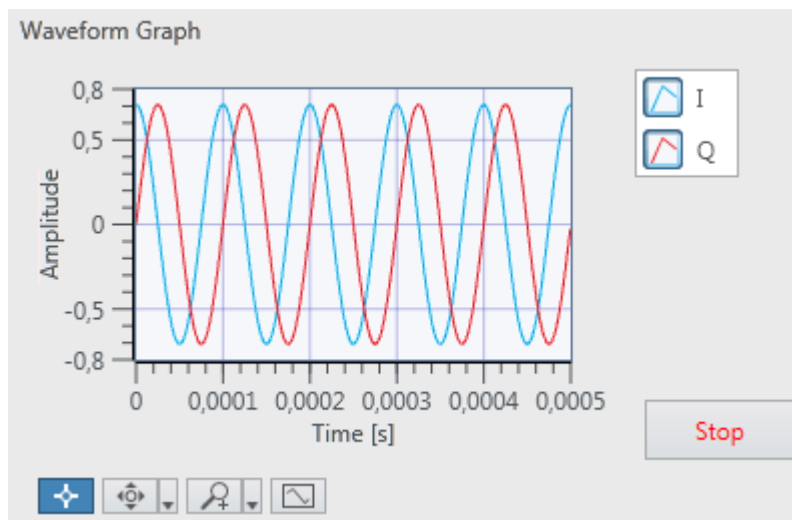


Fig. 35. Señal transmitida-Calibración del seno

A continuación, se muestran las medidas de la recepción de la señal, haciendo una comparativa del ajuste de fase (figuras 36 y 37), y a continuación, se explicará dicha corrección.

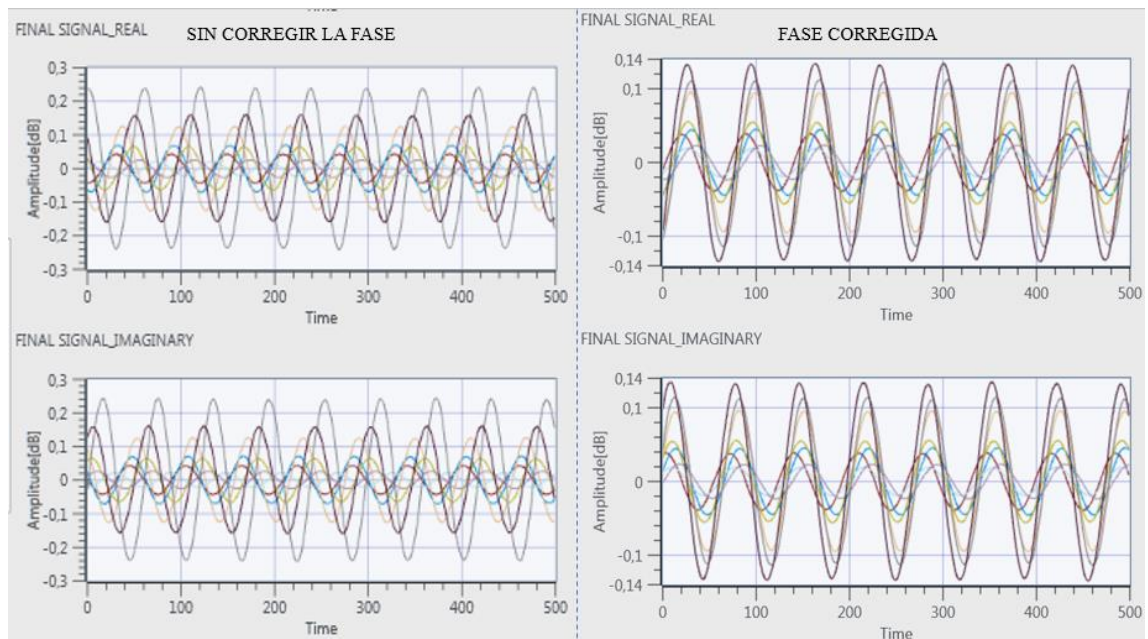


Fig. 36. Comparativa recepción de la señal seno – Partes real e imaginaria

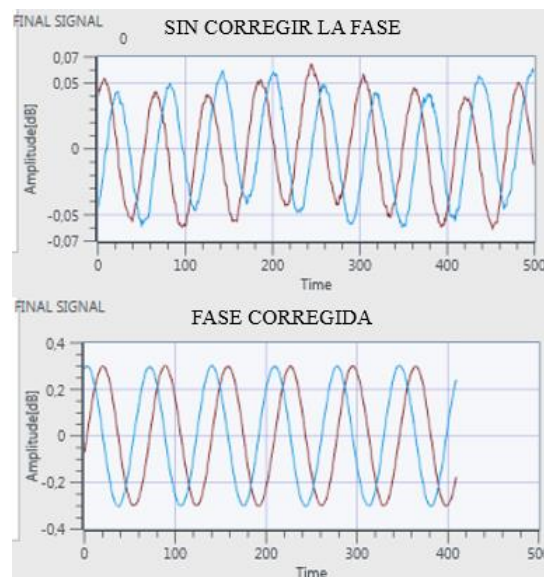


Fig. 37. Comparativa suma de las señales recibidas – Parte real e imaginaria

En las figuras 36 y 37, se hace una comparación entre las señales cuando la fase está corregida y sin corregir. Ahora, se va a explicar cómo ha sido el proceso de corrección de fase y porque se ha producido.

En la figura 36, se han sacado la parte real e imaginaria (por separado) de la señal recibida en las 8 antenas. Lo que se observa en la zona izquierda de la figura, es un desfase de las señales, que se debe corregir. Este desfase de señales se debe a las diferentes distancias que existen entre cada antena receptora y la antena transmisora. Teóricamente, se debe a que la señal sale de la antena transmisora y al estar recorriendo diferentes distancias, la longitud de onda es difícil que coincida a la hora de llegar a las distintas antenas receptoras. Por ello, en la figura 37, que se muestra la señal suma de todas las recibidas, sin corrección de fase, la calidad con respecto a la transmitida no es buena.

La manera de corregirlas ha sido sacando una gráfica de cada una de las señales sin corregir de la figura 36, para poder leer mejor el desfase en las gráficas, sin influir si se coge la parte real o imaginaria. Luego se ha tomado una de referencia, y se ha medido la diferencia de fases de las demás señales con respecto a la señal de referencia. Una vez obtenidos los datos de los desfases, a través de LabVIEW (figura 38), se han restado esos desfases para hacerlas coincidir.

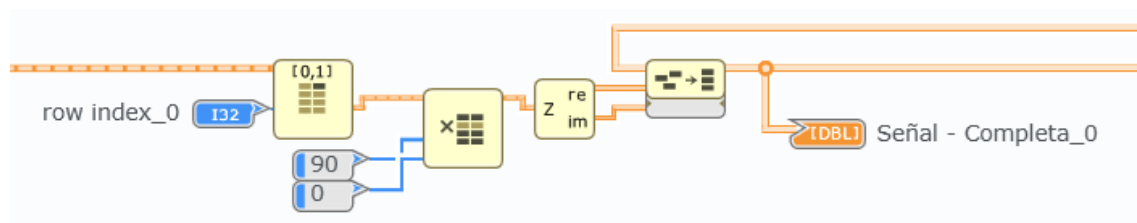


Fig. 38. Corrección de fase – LabVIEW

Tras corregir las fases, en la figura 36 zona de la derecha, se muestra la gráfica de las señales real e imaginarias corregidas. El resultado es notablemente mejor, pero no llega a ser exacto por la imprecisión de las distancias. Pues varía con facilidad, con cualquier interferencia o ligero movimiento de la antena. Siendo la señal suma resultante la que se muestra en la figura 37, con fase corregida. Observando una notable diferencia con respecto sin corrección de fase.

A continuación, se procede a la medición del espectro de la señal recibida en las antenas receptoras. En la figura 39, se muestran el espectro de todas las señales juntas.

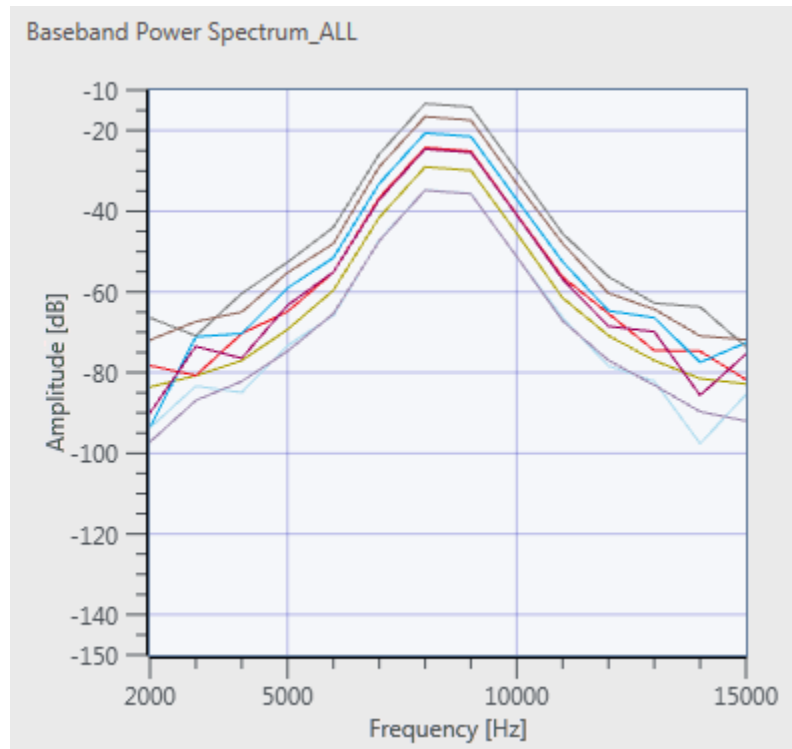


Fig. 39. Recepción de la señal seno – Espectro

En la parte del transmisor, se configuran los valores para una frecuencia de 10 KHz. Como se observa en el espectro, todas las señales recibidas, están juntas y cerca de 10 KHz. Por ellos, se puede afirmar que los USRPs están funcionando de forma sincronizada. En el siguiente capítulo se hará un análisis de estas mediciones realizadas.

4.3.Modulación QPSK

En este apartado, se ha llevado a cabo una segunda implementación. En este caso, se trata del envío y recepción de la modulación QPSK, o también conocida como 4 QAM. En cuanto al prototipo multiantena diseñado, en esta parte del proyecto, se basa en la transmisión de la modulación desde una única antena, que será recibida por 4 antenas simultáneamente. Al igual que, en la implementación anterior, se va a dividir en dos

partes, explicando en una primera parte la implementación del prototipo en LabVIEW, donde se subdividirá en transmisor y receptor; y en una segunda parte las mediciones realizadas de la modulación QPSK en el prototipo multiantena.

En el capítulo 2, se hacía una breve introducción teórica a la modulación QPSK, explicando qué es y cómo funciona. Por lo que, a continuación, se comenzará con la implementación mediante LabVIEW de la modulación QPSK.

4.3.1. Implementación de la modulación QPSK en LabVIEW

En esta primera parte, implementación en LabVIEW, como se ha mencionado, estará dividida en transmisión y recepción que, a su vez, se dividirá: por un lado, la implementación de la programación de bloques; y, por otro lado, la especificación de los valores en el panel de parámetros.

Es importante el orden de estos dos subapartados, primero se implementaría el circuito del prototipo en función de las necesidades que se desean en LabVIEW; y entonces realizada la programación de bloques, solo hay que introducir los datos específicos que se quieren. Al revés es más complejo, pero también es posible. Puesto que no es igual de visual introducir primero los valores específicos sin saber exactamente cómo se va a programar el prototipo.

4.3.1.1. Transmisión

Se comienza con el transmisor y, como en el caso anterior, se ha dividido la programación de los bloques en tres partes para una mejor visualización debido a sus dimensiones. En las figuras 40, 41 y 42 se observan las diferentes partes de los diagramas de bloques necesarios para el envío de la modulación QPSK. En el anexo D, apartado D.2.1 se encuentra el esquema completo del diagrama de bloques.

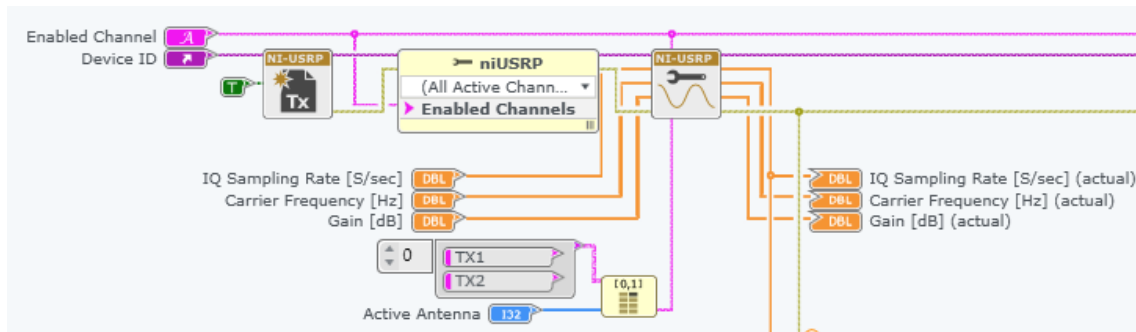


Fig. 40. Parte 1 diagrama de bloques Tx – Modulación

1) En esta primera parte de la implementación del diagrama de bloques (figura 40), se encuentra la configuración del USRP (*Device ID*), como transmisor. Aquí, es donde se configuran todos los parámetros necesarios para su funcionamiento. Siendo:

- Radiocanales habilitados del USRP (*Enabled channels*), cada USRP tiene dos radiocanales posibles para activar.
- Activar las antenas o la antena (*Active Antenna*), como cada radiocanal se subdivide en dos canales, aquí se activarían esos canales, que son directamente la salida de la antena por la que se transmitirá.
- Por otro lado, las muestras por segundo (*IQ Rate*), la frecuencia portadora (*Carrier frequency* en [Hz]) y la ganancia aplicada a la señal de radiofrecuencia (*Gain* en [dB]). Estas tres últimas configuraciones, van a estar limitadas por las especificaciones técnicas del dispositivo, por eso, aparecen como salidas en la configuración (*actual*), porque finalmente, se forzará automáticamente el valor introducido al valor soportado por los dispositivos, en el caso de que este valor sea muy alto.

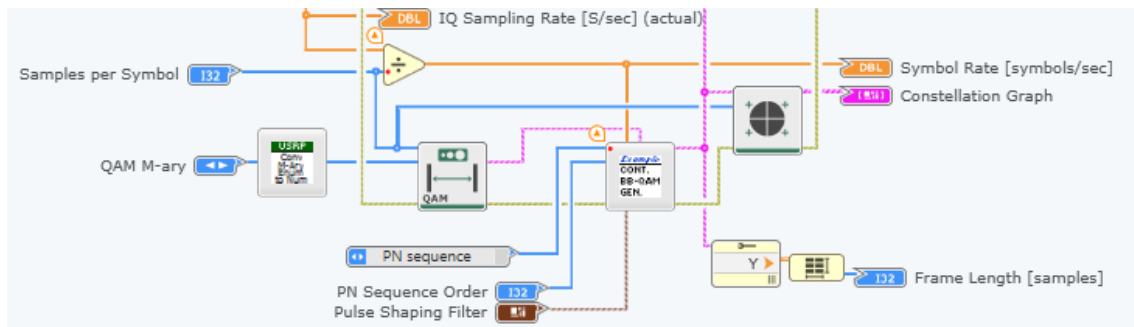


Fig. 41. Parte 2 diagrama de bloques Tx – Modulación

2) En esta segunda parte de la implementación (figura 41), es donde se realiza la configuración de la modulación. Para una mejor explicación, se va a explicar en los siguientes puntos:

- Primero hay que “traducir” al lenguaje de LabVIEW, cuantos estados se quieren emplear en la modulación (*QAM M-ary*).
- Después hay que introducir en un nuevo bloque: las muestras por símbolo (*Samples per Symbol*); y el número de estados que se quiere en la modulación, que es la “traducción” hecha anteriormente. Y de aquí salen definidos los parámetros del sistema QAM.
- Luego se introducen estos parámetros en un nuevo bloque, junto con: la secuencia de ruido pseudoaleatoria y su orden (*PN Sequence*, *PN Sequence Order*), cuya función es el envío de una secuencia determinista de pulso, para satisfacer la comunicación; la conformación de pulsos (*Pulse Shapping Filter*), que es la adaptación de la señal al canal de comunicación [26]. Saliendo, por último, la modulación QAM.
- En cuanto a los siguientes bloques, su única función es la obtención de datos y gráficas.

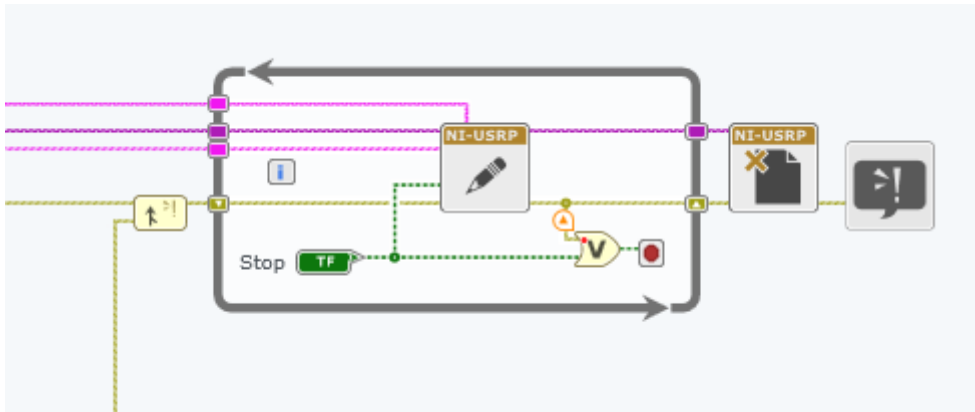


Fig. 42. Parte 3 diagrama de bloques Tx - Modulación

- 3) Esta última parte, de la programación en bloques del transmisor (figura 42), se entra en un bucle donde se escriben todos los datos. Aquí, queda configurado el USRP como transmisor de la modulación QPSK.

Finalmente, ya se ha escrito la configuración de nuestro USRP como transmisor. Cuando se sale del bucle es para cerrar la sesión, esto ocurre si se produce algún error o cuando se pulsa el botón de parar ejecución (*stop*), donde se cierra la sesión para el dispositivo USRP, y se aborta la simulación automáticamente, dejando de transmitir.

Llegado a este punto, la primera parte de implementación de la programación del transmisor ya estaría acabada. Ahora, falta introducir los datos específicos en el panel de características (figura 43).

The screenshot shows a software interface for configuring transmission parameters. The parameters are organized into several sections:

- Device ID:** A dropdown menu set to 'RIO1'.
- IQ Sampling Rate [S/sec]:** A numeric input set to '5k'.
- Carrier Frequency [Hz]:** A numeric input set to '2,45G'.
- Gain [dB]:** A numeric input set to '10'.
- Active Antenna:** A dropdown menu set to 'TX1'.
- QAM M-ary:** A numeric input set to '4'.
- Samples per Symbol:** A numeric input set to '4'.
- PN Sequence Order:** A numeric input set to '13'.
- IQ Sampling Rate [S/sec] (actual):** A numeric input set to '100k'.
- Carrier Frequency [Hz] (actual):** A numeric input set to '100k'.
- Gain [dB] (actual):** A numeric input set to '0'.
- Enabled Channel:** A numeric input set to '1'.
- Frame Length [samples]:** A numeric input set to '0'.
- Symbol Rate [symbols/sec]:** A numeric input set to '25k'.
- Pulse Shaping Filter:** A sub-panel containing:
 - Alpha:** A numeric input set to '0,5'.
 - Filter Length:** A numeric input set to '6'.
 - TX Filter:** A dropdown menu set to 'Root Raised Co'.

A red 'Stop' button is located at the bottom right of the interface.

Fig. 43. Panel características Tx modulación

En la figura 43, se introducen los parámetros con los que se desea hacer la transmisión. Recordando que se va a enviar la modulación por una sola antena. Se va a transmitir por el RIO 1 (*Device ID*), nombre del USRP por el que se envía la modulación. Se habilitará el radiocanal 1 (*Enabled Channel*), para la antena transmisora TX1 (*Active Antenna*). La modulación QPSK es igual que 4QAM (*QAM M-ary*). Las muestras por símbolo empleadas son 4 (*Samples per Symbol*). Una frecuencia portadora (*Carrier Frequency*) de 2.45 GHz, se ha usado la mismo que en la implementación anterior. Esta frecuencia portadora deberá ser igual en la recepción. El orden de la secuencia pseudoaleatoria (*PN Sequence Order*), tiene que ser un valor aproximado de entre 12-14, para visualizar la constelación adecuadamente. Y la conformación de impulsos (*Pulse Shapping Filter*) con valores de Alpha 0.5 (valor medio, su valor puede ser entre 0-1) y longitud del filtro 6.

Un dato destacable en las características es el uso de 5 KM/s (Muestras por segundo, *IQ Rate*). El número de muestras por segundo será mayor en la recepción, porque es donde se quieren observar las gráficas de la modulación que ha sido enviada.

Entonces para ahorrar operación computacional, se ha establecido un número pequeño de muestras por segundo en el transmisor.

4.3.1.2.Recepción

Llegados a este punto, donde la transmisión de la modulación QPSK, o 4QAM, está totalmente completada, para acabar nuestro sistema de comunicaciones inalámbrico falta por implementar la recepción. En nuestro prototipo, la modulación QPSK será recibida por 4 antenas programadas, que realizarán la demodulación. A continuación, se detalla la implementación del diagrama de bloques en tres partes, mediante LabVIEW de la recepción. En el anexo D, se encuentra el circuito completo, ver apartado C.2.2.

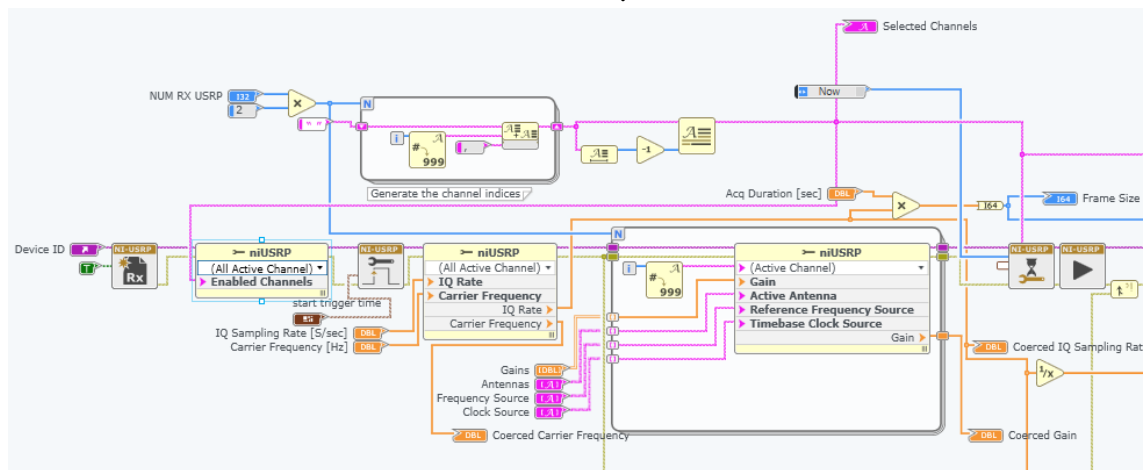


Fig. 44. Parte 1 diagrama de bloques Rx modulación

- 1) Como en las demás implementaciones, este paso (figura 44) es donde se encuentra la configuración de los USRPs (*Device IDs*), como receptores. La complejidad, con respecto a la transmisión, es el uso de más de un USRP trabajando simultáneamente. En esta primera parte se introducen todos los parámetros necesarios para su correcto funcionamiento, siendo:

- Canales habilitados de los USRPs (*Selected Channels*), a través de una pequeña función donde se introduce el número de USRPs (NUM RX USRP), se calcula automáticamente el número de canales a usar, que es necesario saber. Esta función supone que cada USRP va a funcionar en sus dos radiocanales.
- Por otro lado, hay que tener en cuenta los siguientes parámetros: las muestras por segundo (*IQ Sampling Rate* en [Muestras/seg]); la frecuencia portadora (*Carrier frequency* en [Hz]); las ganancias aplicadas a las señales de radiofrecuencia (*Gains* en [dB]); la antena que se activará en cada radiocanal (*Antennas*); y por ultimo las fuentes de frecuencia y reloj (*Frequency Source* y *Clock Source*). Destacando, que todos estos valores van a estar ajustados al límite aportado por el sistema (*Coerced*).
- Tiempo de adquisición (*Acq Duration*).
- Aquí, al tener varias antenas funcionando a la vez, hay que activar el trigger, para la sincronización de las distintas antenas, con un valor inicial.

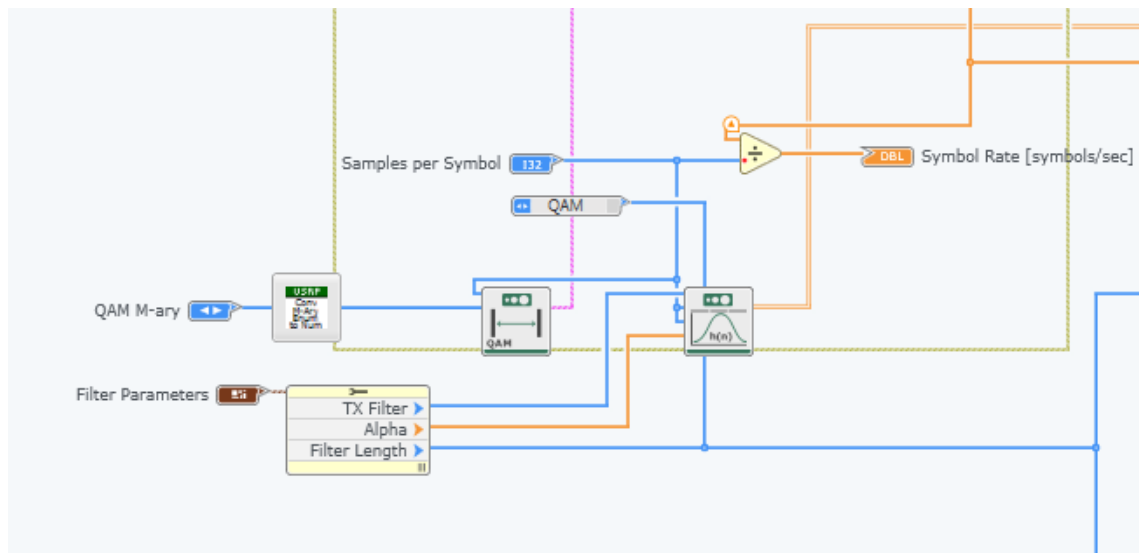


Fig. 45. Parte 2 diagrama de bloques Rx modulación

- 2) En esta segunda parte (figura 45), se configuran los valores de la modulación QPSK, para realizar posteriormente su demodulación. Estos valores deberán coincidir con los parámetros de la modulación que se ha introducido en la transmisión. Estos valores son los parámetros del filtro (*Filter Parameters*), los estados de la modulación empleados (*QAM M-ary*) y las muestras por símbolo (*Samples per Symbol*).

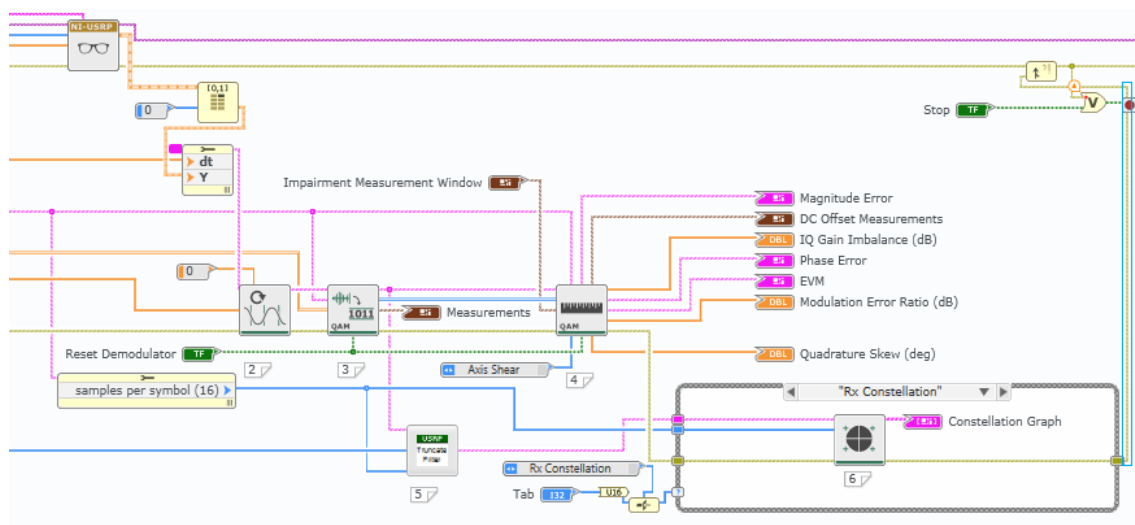


Fig. 46. Parte 3 diagrama de bloques Rx modulación

- 3) En esta última parte (figura 46), que está dentro de un bucle (*loop*), es donde se realiza la demodulación de la modulación recibida. Está dividido en diferentes partes, donde primero se leen todos los datos introducidos y recibidos. Para después, iniciar la demodulación. Los pasos seguidos en dicha demodulación son:

1. Se adquiere la forma de onda IQ del USRP.
2. Volver a muestrear la señal IQ.
3. Realiza la demodulación QAM.
4. Calcula medidas del dominio de modulación.
5. Prepara la señal recuperada para su visualización, en gráficas.

En este apartado, en el último paso se dibujan todas la graficas de las constelaciones recibidas por cada una de las antenas receptoras. En el siguiente apartado (mediciones), se mostrarán dichas figuras.

Hasta aquí, ya se tiene el diagrama de bloques de la recepción preparado, únicamente queda introducir los valores específicos de los parámetros introducidos en este diagrama (Figura 47).

The screenshot displays a software interface for configuring reception parameters. The parameters are organized into several sections:

- Device ID:** A dropdown menu showing 'RIO0:RIO2'.
- Sampling and Frequency:**
 - IQ Sampling Rate [S/sec]:** 350k
 - Coerced IQ Sampling Rate:** 352,112676
 - Carrier Frequency [Hz]:** 2.45G
 - Coerced Carrier Frequency:** 2.45G
- Channels and Gain:**
 - NUM RX USRP:** 2
 - Coerced Gain:** 10
 - Selected Channels:** 0,1,2,3
 - Symbol Rate [symbols/sec]_Symbol Rate [symbols/sec]_4:** 125k
- Modulation and Frame Parameters:**
 - QAM M-ary:** 4
 - Symbol Rate [symbols/sec] Symbol Rate [symbols/sec]_2:** 88,0282k
 - Samples per Symbol:** 4
 - Frame Size [samples]:** 1761
 - Acq Duration [sec]:** 5m
- Filter Parameters:**
 - TX Filter:** Root Raised Cos
 - Alpha:** 0.5
 - Filter Length:** 6
- start trigger time:**
 - whole seconds:** 0
 - fractional seconds:** 1
- Antennas:** Four dropdown menus, all set to 'RX2'.
- Frequency Source:** Four dropdown menus, all set to 'Refin'.
- Clock Source:** Four dropdown menus, all set to 'PpsIn'.
- Gains:** Four vertical sliders, all set to 10.

Fig. 47. Panel características Rx modulación

Por último, en la figura 47, se ajustan los valores específicos a los que se desea realizar la recepción, observando, que, algunos de los valores exigen coincidir con los valores que se han programado antes en la transmisión. Como son, la frecuencia de portadora (*Carrier Frequency*), el número de estados de la modulación que se emplea (*QAM M-ary*) y el número de muestras por símbolo (*Saples per Symbol*). Los valores específicos que se han dado para la recepción de la modulación QPSK son:

- Dispositivo IDs (*Device IDs*): RIO0; RIO2 (Hay 2 USRPs funcionando a la vez).
- Número de USRP (NUM RX USRP): 2.
- Canales habilitados (*Enabled channels*): 0, 1, 2, 3 (4 radiocanales activados), esta parte se rellena automática en función del número de USRPs (NUM RX USRP) y dispositivos IDs (*Device IDs*) que se añadan.
- Antena activa (*Active Antenna*): RX2 (antena del radiocanal activada).
- Frecuencia portadora (*Carrier frequency*): 2.45 GHz, igual que en transmisión.
- Muestras por segundo (*IQ Sampling Rate*): 350 KM/s (MegaMuestras por segundo). Mayor que en Tx, para poder observar mejor las constelaciones. Un valor de muestras por segundo muy alto produce altas operaciones computacionales, por lo que hay que poner un valor alto, pero que permita la simulación del prototipo.
- Ganancias (*Gain*): 10dB.
- Frecuencia y Reloj (*Frequency y Clock Source*): Se mete valor por defecto dentro del circuito, por lo que solo hay que poner RefIn, en frecuencia, y PpsIn, en reloj.
- Parámetros del filtro (*filter Parameters*), igual que en la recepción.
- Start trigger Time, inicializa el reloj del sincronismo.

Dados unos valores reales específicos ya se tiene la recepción configurada para poder recibir la modulación recibida. Llegado a este punto, ya está el prototipo totalmente listo y se entiende tanto su programación, como el valor de sus parámetros. Ya se puede activar la simulación del transmisor, enviando la modulación QPSK, y de la recepción para que las 4 antenas reciban dicha modulación. A continuación, se procede a la

medición del prototipo en la modulación QPSK, donde se adjuntarán diferentes tipos de gráficas, que se han obtenido.

4.3.2. Medición de la modulación QPSK

En la figura 48, se muestra la constelación que ha sido enviada a través de la antena transmisora. Esta constelación, como se observa, pertenece a una modulación 4 QAM o QPSK, por la formación de los 4 estados de modulación empleados. Lo que se quiere en el diseño de este prototipo de sistemas inalámbricos, es la recepción de dicha constelación (figura 48) en las 4 antenas receptoras. Y, en la siguiente figura (figura 49), se puede ver la recepción de la constelación en las 4 antenas receptoras.

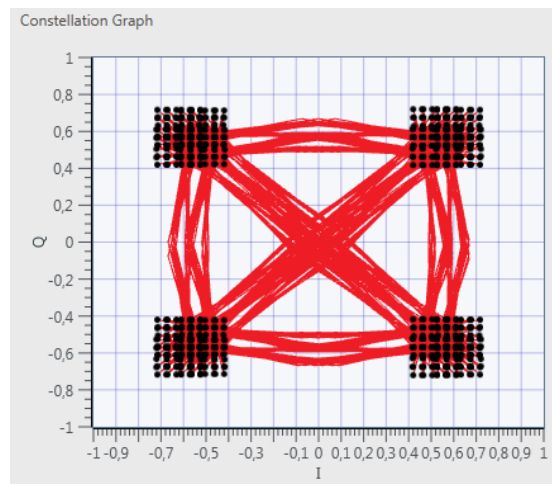


Fig. 48. Medición constelación en Tx

En la figura 49, se muestran, las cuatro constelaciones recibidas en las cuatro diferentes antenas. Se pueden diferenciar con facilidad los 4 estados en la constelación, por lo que su recepción es dicha modulación QPSK. Pero la calidad de la recepción no es del todo favorable. En el siguiente capítulo, se analizarán estas mediciones.

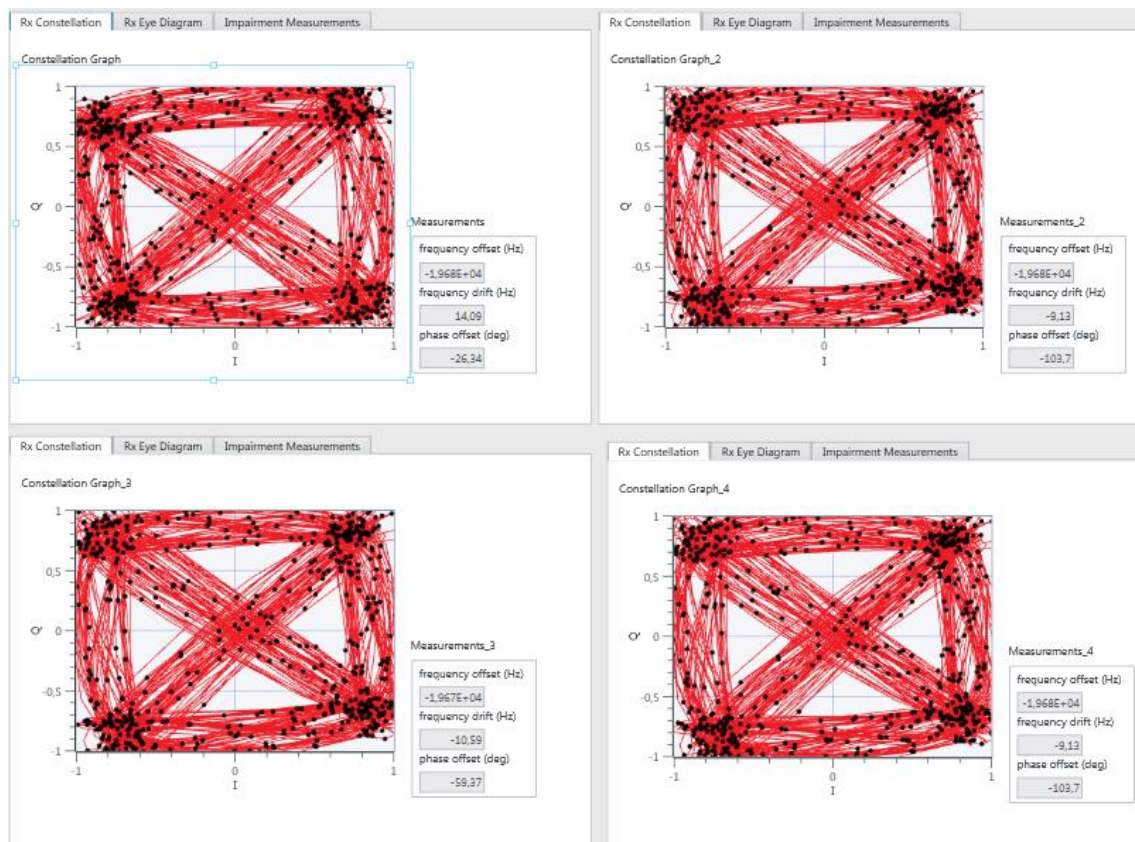


Fig. 49. Medición constelación en Rx

Capítulo 5 : ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS OBTENIDAS EN LA IMPLEMENTACIÓN

Una vez, acabada la configuración, programación y obtención de medidas de la calibración del seno y de la modulación QPSK. En este apartado, se van a analizar todos los resultados obtenidos en dichas medidas. Se aportarán las gráficas necesarias para su mejor entendimiento y, en el siguiente capítulo es donde se obtendrán todas las conclusiones de este análisis de medidas.

5.1. Calibración del seno

Este apartado, dónde se analizarán las medidas de la calibración del seno, se dividirá en dos subapartados, realizándose un análisis en tiempo y otro en frecuencia.

Antes de comenzar con el análisis, hay que mencionar las pérdidas de camino, más conocidas como *path losses*, en inglés. Estas pérdidas afectan en las comunicaciones móviles tanto en la fase como en frecuencia. Es por ello por lo que, en las mediciones, se ha tenido que ajustar la fase para ajustar todas las señales recibidas.

5.1.1. En tiempo

Los resultados obtenidos en tiempo (figura 37) son favorables. En el capítulo anterior se ha llevado a cabo la optimización del desfase, que se producía por la distancia entre las antenas. Gracias a esa optimización se consigue que la suma de todas las señales no sea destructiva, y por ello, la diferencia de la suma de las señales, antes y después de dicha modificación de fases es tan grande. Si se compara la señal transmitida (figura 35) con la señal suma recibida con la fase corregida (figura 37, fase corregida), los resultados son positivos. Se puede concluir, diciendo que gracias a los ajustes de fase se consigue

recibir una señal en tiempo “limpia”, pero con amplitudes menores, debido a que la corrección de fases no se ha podido ajustar con total precisión, por su gran inestabilidad.

Hay que remarcar de la figura 37, que sale recortada en tiempo. Eso se debe a el bloque usado para la corrección de fase (figura 38), cuya función es recortar el tramo de desfase que no convenía, y como en la configuración de la recepción solo se cogen 500 muestras (*Number of Samples Per Fetch*) (figura 34) al recortarlas, se recorta también la señal suma final recibida (figura 37, fase corregida).

5.1.2. En frecuencia

En cuanto al espectro, figura 39, los resultados obtenidos son favorables. La gráfica muestra que todos los USRPs están funcionando conjuntamente, pues todos están en la misma frecuencia. Hay que objetar, que el espectro recibido no está centrado en 10 KHz, como debería. Este ligero desfase es inherente al hardware. Pues en este caso, se está produciendo un desplazamiento de frecuencia del operador (CFO), que es una condición no ideal que afecta directamente al diseño de la recepción [27]. Esto se sabe, porque todos los espectros tienen el mismo comportamiento. Si se tuviera una desalineación en la figura de espectros (figura 39), no tendría tanto sentido pensar que es de un problema del hardware.

La amplitud también presenta variaciones en las diferentes señales recibidas, pero en este caso, esto está relacionado con las pérdidas de camino (*path losses*), mencionado anteriormente. Las antenas receptoras que están más cerca de la antena transmisora presentaran una mayor amplitud.

5.2.Modulación QPSK

Después de conseguir programar, especificar los parámetros y medir los resultados, del envío de una modulación QPSK, en este apartado, se realizará un análisis crítico de las medidas del prototipo. Las pruebas realizadas, dentro de los objetivos, han funcionado correctamente.

5.2.1. Constelación

En la comparativa de la constelación transmitida con la recibida, la recepción de la modulación QPSK se visualiza con claridad (figura 49). Pero los resultados no son del todo favorables. Durante las pruebas realizadas en el laboratorio, el problema está en el número de muestras por segundo, pues si este es muy grande la carga computacional del ordenador se colapsa, mostrando error. Pero si ese número se reduce en gran valor, la constelación no se observa, debido a las pocas muestras que se están tomando. Pues en la recepción, al tener mayor número de bloques para realizar la modulación y demodulación, la operativa computacional aumenta. Aun así, se ha dado un número de muestras por segundo que permite la visualización de la constelación, de la modulación QPSK, en la recepción.

La solución a este problema sería optimizar aún más el código para conseguir espacio de operación computacional y con ello poder incrementar las muestras por segundo tomadas en la recepción. Incluso, se podría llegar a conseguir con 8 antenas receptoras, en vez de con 4 antenas. Esta línea de trabajo queda pendiente para una futura investigación, que se mencionara en el siguiente capítulo.

5.2.2. Diagrama de ojo

El diagrama de ojo es un método que se utiliza para el analizar el comportamiento de los enlaces de transmisión. En el diagrama de ojo se puede observar el comportamiento

de los desfases, niveles de ruido, potencias de las señales, entre otros. Este diagrama no ha sido aportado en la implementación de este prototipo, porque, al tener un bajo valor de muestras por segundo tomadas, su calidad no dejaba que se mediaran correctamente los resultados. Esta parte se queda como línea de trabajo a futuro, como se explicará en el capítulo 6.

Capítulo 6 : CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

6.1.Conclusiones

En este proyecto se llevado a cabo un sistema de comunicaciones inalámbrico, cuyo objetivo era crear diferentes prototipos a través de un equipamiento de alto rendimiento. Los prototipos creados tenían las mismas características, compuestos por una única antena transmisora y múltiples antenas receptoras. Queriendo imitar una comunicación de trafico de subida real, entre un dispositivo móvil (con una sola antena) y una estación base (con múltiples antenas).

Gracias a toda la tecnología facilitada por la universidad Carlos III, se ha podido llevar a cabo una simulación real del prototipo, pudiendo mostrar las mediciones de dichos sistemas. Las diferentes implementaciones, del prototipo de comunicaciones inalámbricas, que se han desarrollado, han sido medidas y sus resultados han sido favorables, resumidos en:

- 1) Ajuste del sincronismo, para obtener unos resultados óptimos, consiguiendo que todos los USRPs funcionen simultáneamente. Cuyo funcionamiento desde la tarjeta de sincronismo consistía en generar y distribuir a todos los USRPs un reloj y un PPS, para su funcionamiento sincronizado.
- 2) Implementación del prototipo enviando desde una única antena hacia 8 antenas receptoras, una señal seno. Observando en una primera recepción el desfase entre las 8 señales recibidas, debido a las diferentes distancias entre las antenas. Pero haciendo las modificaciones necesarias en la corrección de fase requeridas por el sistema, se han conseguido medir unos resultados favorables del prototipo.

- 3) Por último, la implementación de un prototipo con una única antena transmisora, a 4 antenas receptoras. Donde se transmitía una modulación QPSK. En esta implementación, se ha conseguido recibir la constelación transmitida, en las 4 antenas receptoras.

Estos objetivos marcados y conseguidos se han ido detallando y explicando a lo largo de esta memoria, con el objetivo de enseñar el aprendizaje de creación de prototipos SDR (*Software defined Radio*). Pues su uso abre un mundo lleno de posibilidades y grandes avances en el mundo de las telecomunicaciones. Gracias a la flexibilidad que aportan estos sistemas por su simplicidad de programar y ajustar a los requisitos que cada uno desee. Este proyecto es un gran paso dentro de la Universidad Carlos III, pues a partir de este, se pueden crear y probar infinitos prototipos de forma real para su uso práctico en el mundo de las comunicaciones inalámbricas.

6.2.Líneas futuras de trabajo

Dentro de este apartado hay que comentar varios aspectos. En este proyecto, se presentan dos claras líneas de trabajo a futuro, las cuales pueden ser desarrolladas a partir de las diferentes implementaciones, como son:

- 1) En la calibración del seno, se puede conseguir implementar un sistema MIMO, donde exista la posibilidad de conectar múltiples antenas transmisoras con múltiples antenas receptoras, mejorando las características del sistema de comunicaciones. Este proyecto presentaría una gran complejidad a la hora de estimar el canal. Pero teniendo las bases de esta memoria donde se implementan múltiples antenas en la recepción, puede ser un buen proyecto a futuro, puesto que se le resta la complejidad de tener que programar las múltiples antenas.
- 2) En la modulación, como posible continuación de este proyecto, cabe la posibilidad de implantar un sistema MIMO, al igual que en la calibración del seno. Pero

requiere de un proceso previo de síntesis de código de bloques para optimizar la carga de operación computacional y poder obtener mejores resultados. En LabVIEW es imprescindible tratar de optimizar la programación, de lo contrario, su funcionamiento puede rebasar, llegando al bloqueo del ordenador.

Ambas líneas de trabajo mencionadas resultan interesantes de desarrollar. Pero a partir de este proyecto pueden surgir muchas más líneas a futuro. Pues la documentación de estas implementaciones puede servir de guía para entender la programación mediante bloques en LabVIEW.

ANEXOS

Anexo A: Marco regulador

Dentro del marco regulador de las telecomunicaciones, existen una serie de códigos, como las normas, regulaciones, derechos y estándares aplicables, cuyo objetivo es el funcionamiento armónico de las telecomunicaciones.

A.1. Regulación

La regulación es ajustarse a una regla general o establecida. El gobierno en España es el encargado de las regulaciones, específicamente desde la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones (CMT), a través de decretos y/o leyes. Dentro de las telecomunicaciones existen una infinidad de leyes y regulaciones, por lo que se van a comentar en general dos regulaciones importantes en este sector.

La siguiente regulación marca el inicio de un consenso entre todos los estados miembros de la Unión Europea. Cuyo objetivo es la coordinación a nivel europeo del espectro radioeléctrico.

- “*Decisión n°676/2002/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 7 de marzo de 2002, sobre un marco regulador de la política del espectro radioeléctrico en la Comunidad Europea (Decisión espectro radioeléctrico)*” [28].

Después de esta regulación, los organismos regulatorios nacionales tienen la obligación de coordinar las bandas usadas dentro del espectro de radiofrecuencias. En los diferentes aspectos de regulación de las telecomunicaciones esta regulación aplicada es la influyente.

A continuación, se adjunta otra ley aplicable de las comunicaciones móviles, que fue modificada de la Ley 32/2003 y se recoge actualmente en la Ley 13/2012, de 30 de marzo, y dice:

- *“Las modificaciones introducidas en la Ley 32/2003, de 3 de noviembre, General de Telecomunicaciones, persiguen crear un marco adecuado para la realización de inversiones en el despliegue de redes de nueva generación, que permita ofrecer servicios innovadores y tecnológicamente más adecuados a las necesidades de los ciudadanos. Para ello, entre los objetivos y principios de la Ley, se introduce el fomento de la conectividad y la interoperabilidad extremo a extremo de redes y servicios de comunicaciones electrónicas y la promoción de la capacidad de los usuarios para acceder y distribuir información a través de cualquier aplicación o servicio.” [29]*

Esta ley, hace referencia al progreso e innovación de las telecomunicaciones a nivel nacional, es decir, el gobierno abre sus puertas para tener en cuenta el nuevo marco regulador para la llegada de las nuevas generaciones de estándares móviles.

Otras de las leyes existentes en los trabajos es la Ley de Riesgos Laborales o la Ley de Responsabilidad Civil. Esta primera ley recoge los derechos tanto de accidentes como de enfermedades, del trabajador. No es aplicable dentro de este proyecto, puesto que es una tarea universitaria y no presenta las mismas condiciones que un trabajador. En cuanto, a la segunda, es la ley que recoge las responsabilidades que un profesional tiene a la hora de realizar su trabajo. En este proyecto, se hace presente en cuanto a la responsabilidad de originalidad del documento entregado.

A.2. Estándares

Por otro lado, existen los estándares de telecomunicaciones. Un estándar sirve para tener un modelo general, un patrón, que haga de referencia para conseguir una unificación lo más internacional posible. Se dirigen a través de la ISO (*International Organization for Standardization*), estos estándares son acuerdos documentados que engloban tanto la parte técnica como los materiales, productos y servicios [30].

Los estándares de comunicaciones móviles, que están implicado dentro de este proyecto, son los escritos a partir de la cuarta generación (4G) de estándares de comunicaciones móviles. Estos estándares están recogidos en 3GPP, que fue formada por la colaboración de diferentes miembros organizativos (Asia, Estados Unidos y Europa). El 3GPP recoge todas las especificaciones técnicas que engloba el sistema de comunicaciones dentro de un marco internacional. Dentro del 3GPP también se están escribiendo las especificaciones técnicas del 5G [31] [32].

La especificación del estándar implicado en cada prototipo depende directamente de las características o especificaciones a las que el proyecto se quiera enfocar. Dentro de cada proyecto puede haber implicadas, una gran variedad de especificaciones. Pero, normalmente los prototipos que se desarrollan suelen ser los más novedosos, ya que estarían en proceso de prueba, como es el caso de los prototipos 5G, y cuyos objetivos es la documentación técnica de las especificaciones. Existen prototipos ya creados, pero no se ha cerrado el cuadro de especificaciones técnicas del 5G por la 3GPP todavía.

A.3. Propiedad intelectual

Otro aspecto a tener en cuenta es la propiedad intelectual, que es definida como todo bien económico que incluye productos físicos o intangibles y, sus derechos pertenecen al autor que ha desarrollado el trabajo. En cuanto al desarrollo del software es

complejo obtener los derechos de autoría. Pero su regulación existe y se tramita a través de la Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM), la legislación más actual es la Ley 24/2015 [33], cuya función es reservar el derecho exclusivo de la idea a la persona física que ha creado el software durante un tiempo limitado.

Por otra parte, están los derechos de autoría del Trabajo Final de Grado. En este caso, la autoría pertenece al alumno y tutor que lo realizan, pero firmando la autorización de publicación se reconoce su uso como no comercial o sin obra derivativa [34].

Anexo B: Entorno socioeconómico

B.1. Impacto socioeconómico del proyecto

Actualmente, el mundo de las telecomunicaciones tiene un gran impacto tanto social como económico. Las comunicaciones móviles, cuyo crecimiento ha sido exponencial, cubren las necesidades de una sociedad, que a día de hoy son imprescindibles. El lanzamiento de la cuarta generación (4G) de estándares de comunicaciones, impulso el uso de datos en los dispositivos móvil, creando un gran impacto económico positivo. Las compañías empezaron a crean planes de datos a medida para los clientes.

Desde el punto de vista de la creación de prototipos SDR. Como es el caso del software LabVIEW, cuyo impacto fue de grandes dimensiones, por su capacidad de crear ideas diferentes e innovadoras sin la falta de programación de bajo nivel. También cubre la necesidad de poder realizar simulaciones de problemas reales en la actualidad, validando los prototipos rápidamente a través de implementaciones físicas directas. Todo esto, crea un gran impacto en la sociedad, por el hecho de acelerar la productividad, innovación y descubrimientos [35] [36].

Centrándose en este trabajo, el impacto socioeconómico de este proyecto va a ser a nivel de universidad, gracias a este proyecto, se tendrá una base para realizar prototipos en SDR más avanzados. El equipamiento, para realizar prototipos de sistemas de comunicaciones inalámbricas, que la Universidad Carlos III posee es de última generación, y con la ayuda de este proyecto, se pueden continuar la innovación en el desarrollo de prototipos. Pudiendo llegar a competir con universidades como la de Bristol o Lund, que son potencialmente innovadoras en este ámbito, y usan los mismos dispositivos que en la Universidad Carlos III. Y con ello, conseguir un impacto socioeconómico positivo. Al conseguir empezar a competir internacionalmente, la

universidad obtendría mayores financiaciones de investigación (impacto económico), y un mayor reconocimiento mundial (impacto social).

B.2. Impacto medioambiental del proyecto

El impacto ambiental que este proyecto presenta está meramente ligado al impacto medioambiental que el equipamiento implicado posee. La instrumentación utilizada proviene de la empresa National Instruments (NI). Según las especificaciones que NI posee en la página oficial, es su compromiso en reducir la huella ecológica global, diseñando y fabricando productos de manera ambientalmente responsable. Trata de eliminar las sustancias peligrosas para el medio ambiente de sus productos, apoya los programas de reciclaje de productos y recursos. Y da prioridad a la reducción de recursos como el agua y la electricidad en todas sus instalaciones [22] [37].

B.3 Planificación del proyecto

Para la planificación del proyecto se ha diseñado un diagrama de Gantt, adjuntando también la tabla correspondiente (tabla 1), para poder visualizar de forma simple la correlación existente entre las diferentes tareas desarrolladas y el tiempo que han conllevado hacerlas. Las tareas en las que se ha dividido la planificación del proyecto se han hecho coincidir con la estructura de la memoria. Ya que la memoria, al igual que la planificación, se ha desarrollado de manera estratégica, para conseguir un orden lógico en relación a dificultades y conceptos. Por ello, primero se plantea una estructura de objetivos dentro de una introducción, pasando por los conceptos teóricos que requiere este proyecto, hasta llegar a su implementación. Acabando con los diferentes entornos que envuelven al proyecto. Los tiempos dados en los siguientes datos, incluyen tanto la parte de trabajo como la parte de documentar dicho trabajo en la memoria. El total de días de trabajo es de 136 días, con inicio el 24 de enero y fin el 9 de junio.

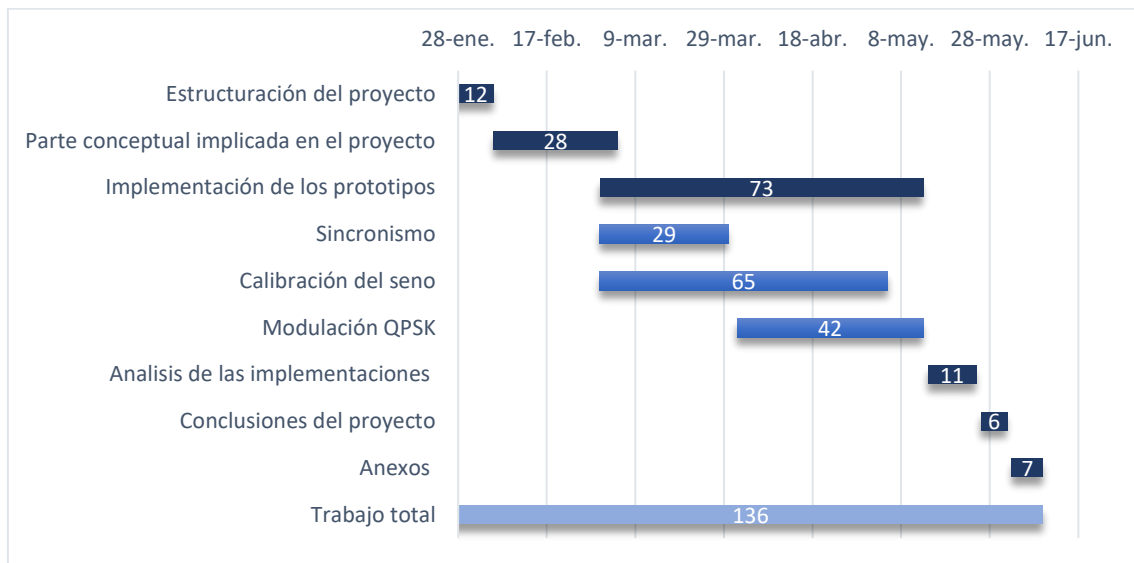


Fig. 50. Diagrama de Gantt planificación

Tarea	Fecha inicio	Fecha fin	Días
Estructuración del proyecto	24-ene.	5-feb.	12
Parte conceptual implicada en el proyecto	5-feb.	5-mar.	28
Implementación de los prototipos	1-mar.	13-may.	73
Sincronismo	1-mar.	30-mar.	29
Calibración del seno	1-mar.	5-may.	65
Modulación QPSK	1-abr.	13-may.	42
Análisis de las implementaciones	14-may.	25-may.	11
Conclusiones del proyecto	26-may.	1-jun.	6
Anexos	2-jun.	9-jun.	7
Trabajo total	24-ene.	9-jun.	136

Tabla 1. Planificación del proyecto

B.4 Presupuesto del proyecto

En este apartado, se ha detallado el presupuesto incluyendo:

- La mano de obra que ha sido necesaria (en horas), tanto del tutor como del alumno, con sus respectivos precios.
- El material implicado en el desarrollo de dicho proyecto, cuyos modelos y características han sido descritas en el capítulo 3 [24] [23] [38] [39] [40] [41] [42].

TOTAL	Presupuesto
	79.314,10

Mano de obra	Horas	Precio/hora	Total
Trabajo tutor	70,00	25,00	1.750,00
Trabajo alumno	550,00	6,00	3.300,00
Total Mano de obra	620,00	31,00	5.050,00

Equipo y software	Unidades	Precio/unidad	Total
USRP	5,00	6.629,40	33.147,00
PXIe	1,00	8.846,10	8.846,10
Tarjeta de sincronismo	1,00	4.748,00	4.748,00
Distribuidor de reloj	1,00	1.926,00	1.926,00
Osciloscopio	1,00	22.500,00	22.500,00
Ordenador	1,00	1.200,00	1.200,00
Antenas	10,00	41,00	410,00
Licencia LABVIEW	1,00	1.487,00	1.487,00
Total Equipo y software	21,00	47.377,50	74.264,10

Tabla 2. Presupuesto del proyecto

Anexo C: Resumen en inglés de todos los contenidos

C.1. Introduction

Nowadays, mobile communications have a very important role to play in our lives. More than 95% of the world's population has access to mobile coverage. Meaning that the field of telecommunications is growing very fast, implying innovation, use of new technologies and progress. Currently, the fifth generation (5G) of communications standards is closer than ever, bringing the world of the Internet of Things (IoT), where billions of devices are expected to be connected to the network. The discovery of multiantenna technology, used in wireless communications, got a big change in telecommunications.

Since the communications are a essential part of the society, this project is a good challenge, where I can learn and apply all the concepts got in the bachelor degree. Also this project will be used for future students who want to focus in this field, and for the department of communications and signal of the University Carlos III of Madrid will be useful too, because after this project they will have different documented examples of implementations as a basis to support future projects.

C.2. State of art

The multiantenna technology have revolutionized the telecommunication's world, as it is mentioned before. Then, it is a brief introduction of the different types of multiantennas used. Starting by the SISO technology, which is Single Input Single Output, where the wireless communication system is composed by a single transmitter antenna and single receiver antenna. Following by:

- La tecnología MISO, which is Multiple Input Single Output, where there are multiple transmitter antennas and a single receiver antenna.
- La tecnología SIMO, which is Single Input Multiple Output. There is a single transmitter antenna and multiple receiver antennas.

And, finally the MIMO technology, which is Multiple Input Multiple Output. This technology is the most innovative one. That will be present in the implementation of the 5G. Thanks to the features it brings as higher transmission ratings and more reliability in the transmission.

- **Project prototype**

Focusing on the scenario created by this project, it wants to simulate a base station with multiple receiver antennas and a single transmitter antenna on the mobile device. The different types of multiantenna technology, to this scenario, depending on the traffic (ascent or descent), where it gets:

- In the descent traffic, MISO technology will be used, seeing a communication scheme with multiple transmitter antennas on the base station that only send to a receiver antenna on the mobile device.
- In the ascent traffic, on the contrary, SIMO technology will be used, following a scheme where the mobile device transmits from its antenna to the multiple receiver antennas of the base station. This is the one which will be implemented.

- **Benefits obtained in the prototype of the project**

Focusing the Project on the ulink traffic, a SIMO system is obtained. As explained, there may be two types of gain, capacity or diversity. By capacity, as Shannon's theorem

says, where: $C = A * \log_2(1 + SNR)$, where SNR = Signal to noise ratio [dB] and $A = \min(M,K)$, being the number of transmitting (M) and the receiving (K) antennas. Therefore, a SIMO system does not have gain in capacity, since the number of antennas in the transmitter is 1, and then A would be 1 as well.

Consequently, the system SIMO present gain for diversity. This is due to the use of multiple antennas (K) in the reception. Well, multiple communication channels (K) are created, as many as receiving antennas. As the antennas in the base station are sufficiently separated, it can be considered that the channels that are formed between the different antennas are completely uncorrelated. Therefore, in the system there are K independent channels between the mobile device and the base station. And, it can be said that $E\{H_i H_j^*\} = 0$, the mean between the different channels that are formed is null. Where i is different from j. And then, the gain for diversity is guaranteed.

- QPSK modulation

The QPSK modulation (*Quadrature phase-Shift Keying*) is a digital modulation that comes from the modulation of phase shift, with a limited number of States. This modulation also known as 4-QAM modulation, despite of the differences between PSK and QAM modulation, these two specific modulations present the same characteristics.

- Introduction to SDR and LabVIEW

SDR (*Software Defined Radio*), which is a radiocommunication system where hardware elements, such as USRPs, can be implemented through software, using a computer. It is very useful for two reasons:

- It allows easy change of the configuration of the protocols and waveforms.
- It allows the simple implementation of many prototypes created theoretically.

SDR makes possible the innovation in telecommunications to progress more quickly, because of the flexibility it brings. Thanks to that it allows the creation of prototypes, being able to see results and measurements before its real launching, thus it manages to optimize previous errors that can arise. The SDR platform created in this project has used LabVIEW software.

LabVIEW is a system engineering software that facilitates testing, design and rapid control of real or simulated hardware. It is a type of graphical programming, unlike other programming languages, it provides a simpler view of every aspect of the application. It is very useful for its fast and extensive hardware integration, and for its graphical programming approach. Throughout the project, the configurations in LabVIEW Communications, a LabVIEW-specific suite, of the created prototypes have been shown. The choice of this version of LabVIEW is due to the specialization of the software to the needs of the project. This configuration will be divided into two different blocks, the transmitter and the receiver, but they must provide common characteristics so that their communication is possible.

C.3. Equipment used in the project

In this project have been involved different resources, which have been necessary for their development, such as:

- The **USRP** (Universal Software Radio Peripheral), which as its name indicates, is a peripheral transceiver of radio communications by Universal Software. Which works as a Software-defined Radio device (SDR), which serves to create prototypes of wireless communications systems, using software. This project has used the model NI USRP-2942R.
- The platform or chassis **PXIe** (Peripheral component interconnect eXtensions for Instrumentation) allows to produce prototypes with high performance

connections, allowing to connect several USRPs, so that they can work simultaneously. The model used has been NI PXIe-1085. It contains the synchronism card NI PXIe-6674T.

- The **OctoClock** is a clock distributor and is responsible for distributing the clock to all USRPs. The model used is the OctoClock-G CDA-2990. Whose function is that all USRP work with the same reference and are not in phase difference.
- The **computer** has been essential for the software Programming of the USRPs, through LabVIEW. And the **oscilloscope**, whose MODEL used has been DSO90604A Digital Storage Oscilloscope, has served as a very useful tool to be able to measure, verify, and ensure the measurements made of the prototype of systems Wireless.

C.4. Prototype implementation

The real scenario it wants to simulate the prototype presented is the wireless connection between a mobile device with a single antenna and the base station with multiple antennas. By focusing on uplink traffic, a SIMO system is obtained, as it consists of a single transmitting antenna (mobile device) and multiple receiving antennas (base station). The different implementations of this project are:

- **Synchronism:**

It is the orchestrated operation of all the USRPs, to do not getting phase differences when sending and receiving signals. For a better understanding of this concept, the synchronism offers the "reference point" equal to all the devices USRPs, having all these devices the same reference, they will operate in a synchronized way. In this section, both the clock distributor and the synchronism card are essential. It is

necessary to be clear about the operation of these two devices especially, although in practice they are all of vital importance for their involvement in making the connections. To activate synchronism, we have to have both the hardware and the software connected. The synchronism is formed by sending to all the USRP a PPS (Pulse per second) of 1 Hz, and a clock of 10 MHz.

- **Hardware connection.** It's the physical connection of all the circuit wires.

For a correct operation, they must be connected:

- Reference USRP with PXIe chassis sync Card.
- The PXIe chassis sync card with the clock distributor.
- The clock distributor with all USRP devices.

- **Software connection.** It is the guided connection of the synchronism through the computer. Here you must route the paths of the sync card.

There are two different routed paths:

- PFI0 - PFI3: This routing sends the PPS from the reference USRP to the clock distributor.
- PXI_Clk10 - ClkOut: This routing sends the 10 MHz clock from the sync card to the clock distributor.

After making these connections the synchronism would be activated. Paying special attention to the threshold, when different equipment is connecting, the technical specifications are different. In this case the threshold limit in PFI0 is 0.9664 V.

- **Sine calibration**

In this implementation of the multiantenna prototype designed, it is presented with a transmitter antenna and eight receiver antennas. The function of the sine calibration is the sending from the transmitter antenna a sine signal, which will be received by the eight

receiver antennas. This section will be divided into two parts, explaining in the first part the implementation of the prototype in LabVIEW, where it will be subdivided into transmitter and receiver; And in a second part the measurements made of the multiantenna prototype.

- **Transmitter and receiver programming**

1) **Transmitter:** All the necessary blocks have been configured for the transmission of a sine signal. And one of the USRP has been established as a transmitter, through block programming. After making the block configuration, specific values have been given, in the features panel. The values which it wants to perform wireless communication, such as carrier frequency (2.45 GHz), the number of samples per second taken, the active radiochannels of the USRP (1 active radio channel), the active antennas and the gain of the transmitter antenna, among others.

2) **Receiver:** In the reception the methodology used has been the same as in the transmission, changing some values and configurations. All the necessary blocks have been configured to receive a sine signal, with multiple antennas at the same time. And several USRP have been established as receivers, through block programming. Afterwards, the specific values of the wireless communication are to be performed, in the features panel, such as the carrier frequency (2.45 GHz), which must be the same as in the transmission, the number of samples per second taken, the active radiochannels of each USRP (8 active radiochannels), the active antennas and the gain of the transmitting antenna, among others.

- **Prototype measurements**

Looking over the first results obtained, it has been necessary to make a phase correction, so the reception of the sum of the 8 sine signals was destructive, because of the difference of phases. By making this correction the results have improved favorably. In terms of spectrum measurement, a synchronized operation of all USRP is observed.

- **QPSK modulation**

This second implementation is about sending and receiving QPSK modulation, also known as 4 QAM. For the multiantenna prototype designed, in this part of the project, it is based on the transmission of the modulation from a single antenna, which will be received by 4 antennas simultaneously. As in the previous implementation, it will be divided into two parts, explaining in the first part the implementation of the prototype in LabVIEW, where it will be subdivided into transmitter and receiver; and in a second part measurements made of the QPSK modulation in the multiantenna prototype.

- **Transmitter and receiver programming**

1) **Transmitter:** All the necessary blocks for the transmission of a QPSK modulation have been configured. And one of the USRP has been established as a transmitter, through block programming. After making this configuration by blocks, the specific values have been given, in the characteristics panel. The values which it wants to perform the wireless communication, as the modulation used (4 QAM, which is equal to QPSK), the carrier frequency (2.45 GHz) , the number of samples per second taken, the active radiochannels of the USRP (1 active radio channel), the active antennas and the gain of the transmitting antenna, among others.

2) **Receiver:** in the reception the methodology used has been the same as in the transmission, changing some values and configurations, because here you have to perform the demodulation. All the necessary blocks have been configured for the reception of the QPSK modulation, with multiple antennas at the same time. And several USRP have been established as receivers, through block programming. Then, the specific values which it wants to perform the wireless communication have been given in the features panel, such as the modulation used (4 QAM, which is equal to QPSK), the carrier frequency (2.45 GHz) which must be the same as in the transmission, the number of samples per second taken, the active radiochannels of each USRP (8 active radiochannels), the active antennas and the gain of the transmitting antenna, among others.

- **Prototype measurements**

Observing the results obtained, the QPSK modulation, which is sent by the transmitter, is received by the 4 receiving antennas favorably. Then, the measured results will be analyzed.

C.5. Analysis and conclusions of the Project

It concludes with positive results in the different implementations. As the objectives marked have been fulfilled and both implementations work. The analysis of the measures in the implementations is shown below.

- **Sine calibration**

As discussed in the implementation, it has required to perform a phase optimization. Trying to get the sum of all the signals not destructive, and therefore the difference in the sum of the signals, before and after this phase modification is big. If when compared to the transmitted signal the results are positive. It can be concluded,

saying that thanks to the phase adjustments it is possible to receive a "clean" signal in time, but with smaller amplitudes, because the correctness of phases has not been completely efficient, due to its great instability.

- **QPSK modulation**

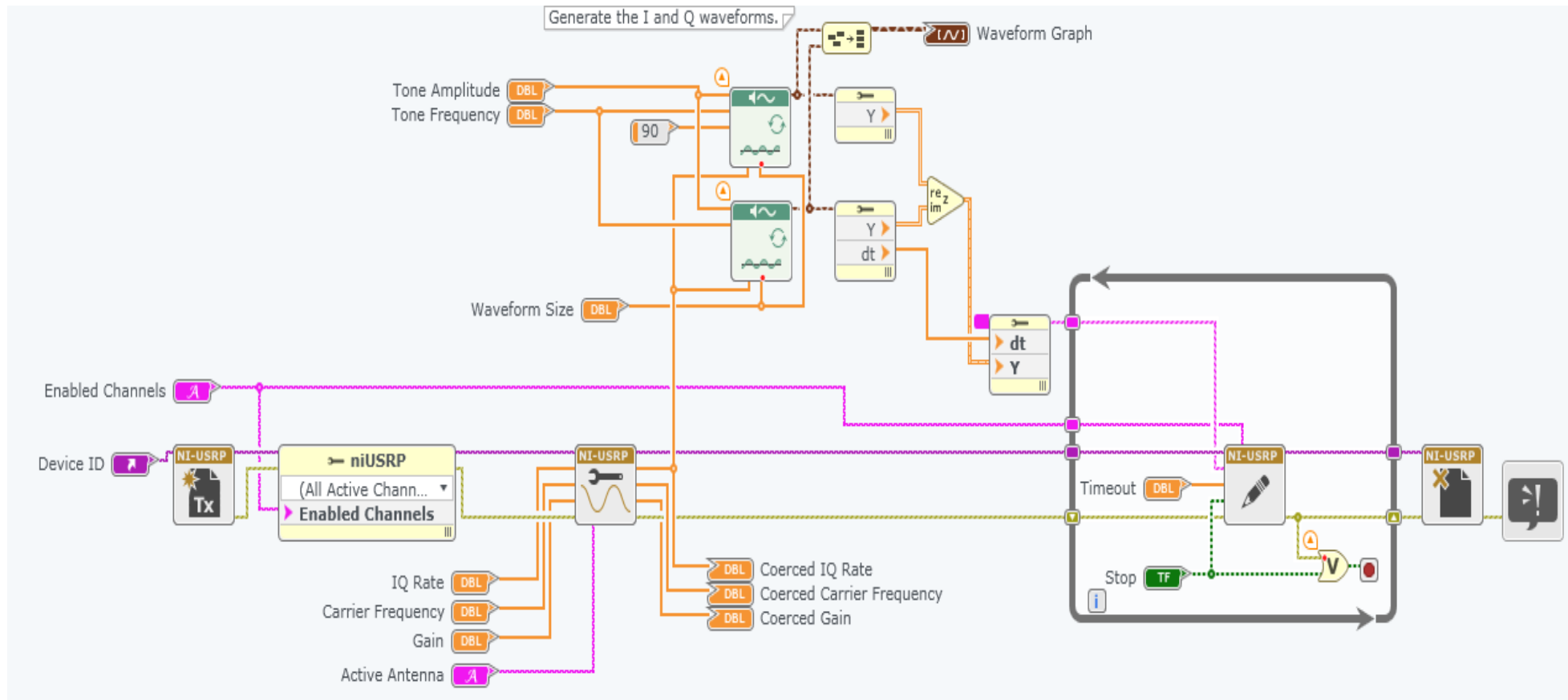
In the comparison both, the transmitted constellation with the received constellation, the reception of the QPSK modulation is clearly displayed. But the results are not entirely favorable. During tests carried out in the laboratory, the problem is in the number of samples per second, because if this number is very large the computer load of the PC collapses, showing error. But if that number is reduced to a small value, the constellation is not observed, because of the few samples that are being taken. The solution is in the optimization of the code, because the modulation presents extra blocks that has high computational load.

Anexo D: Diagrama de bloques de las implementaciones del prototipo

En las siguientes páginas, se encuentran los diagramas de bloques programados en LabVIEW completos. Algunos de dichos diagramas se han dividido en dos partes debido a su gran tamaño.

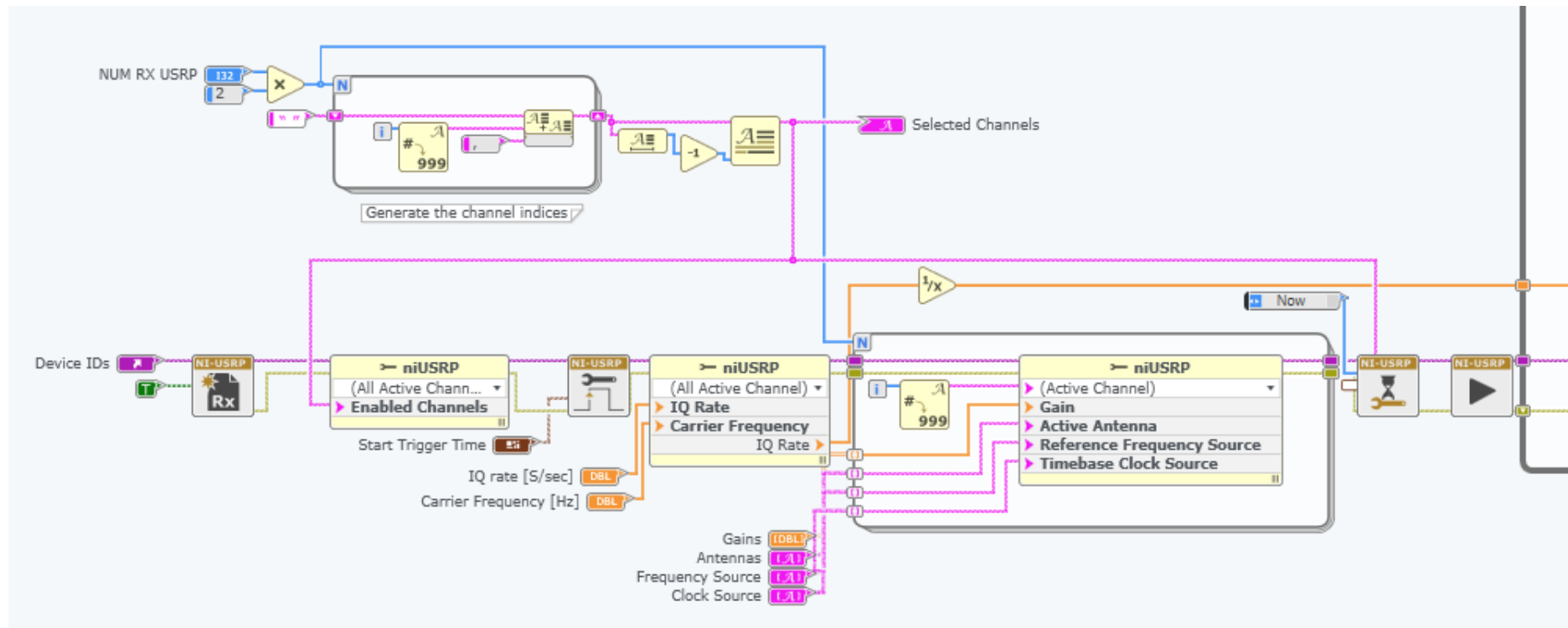
D.1 Diagrama de bloques de calibración del seno

D.1.1 Transmisión de la calibración del seno

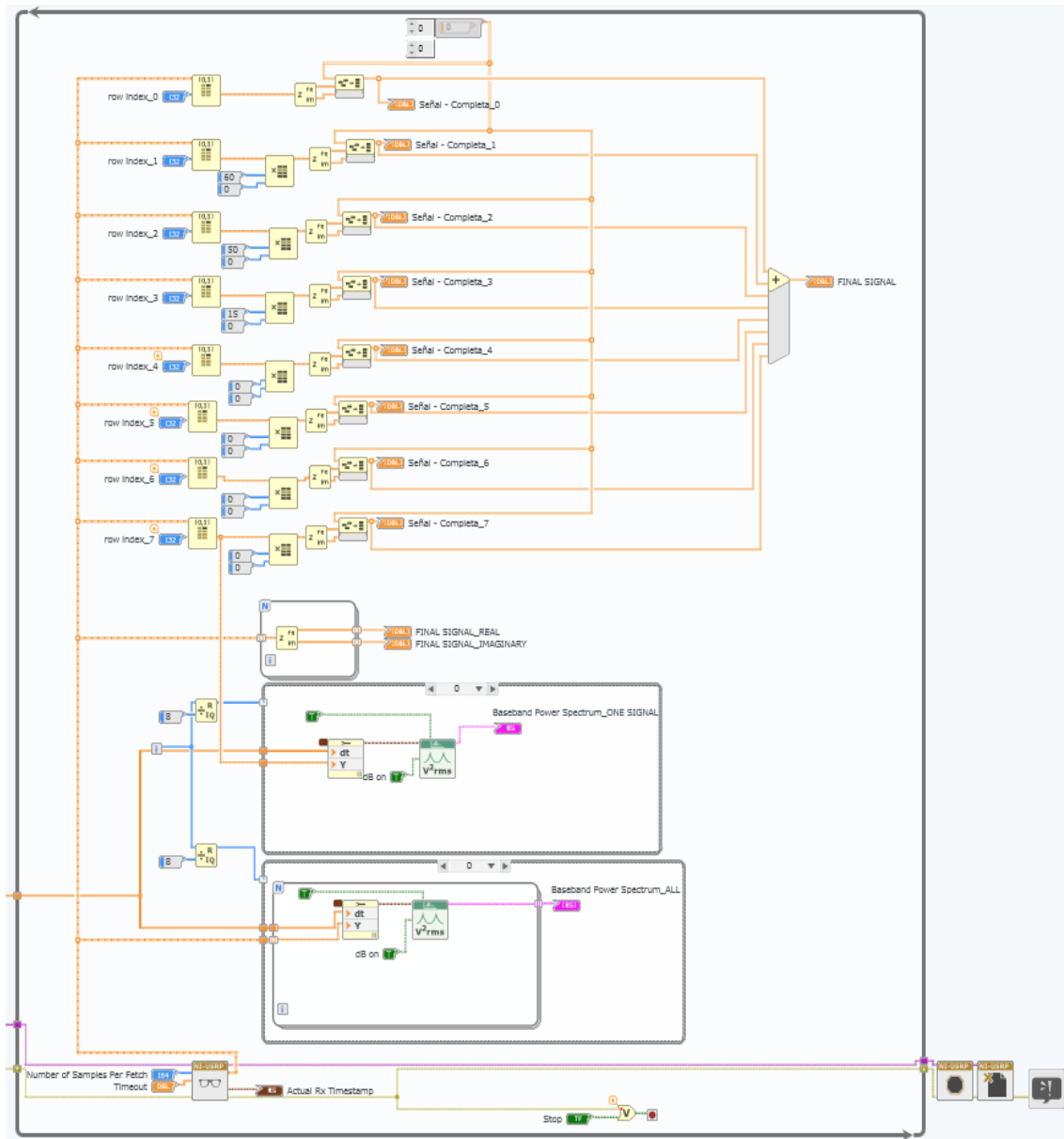


D.1.2 Recepción de la calibración del seno

D.1.2.1 Recepción de la calibración del seno – Parte 1

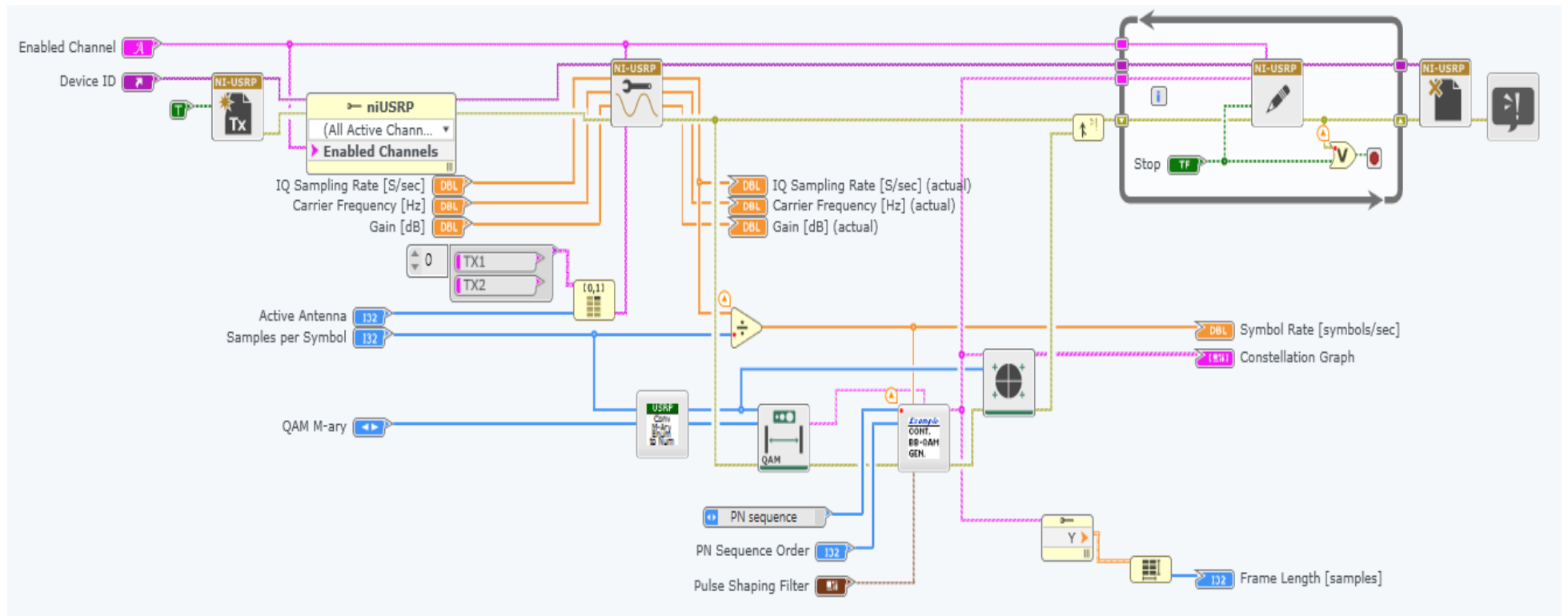


D.1.2.2 Recepción de la calibración del seno – Parte 2



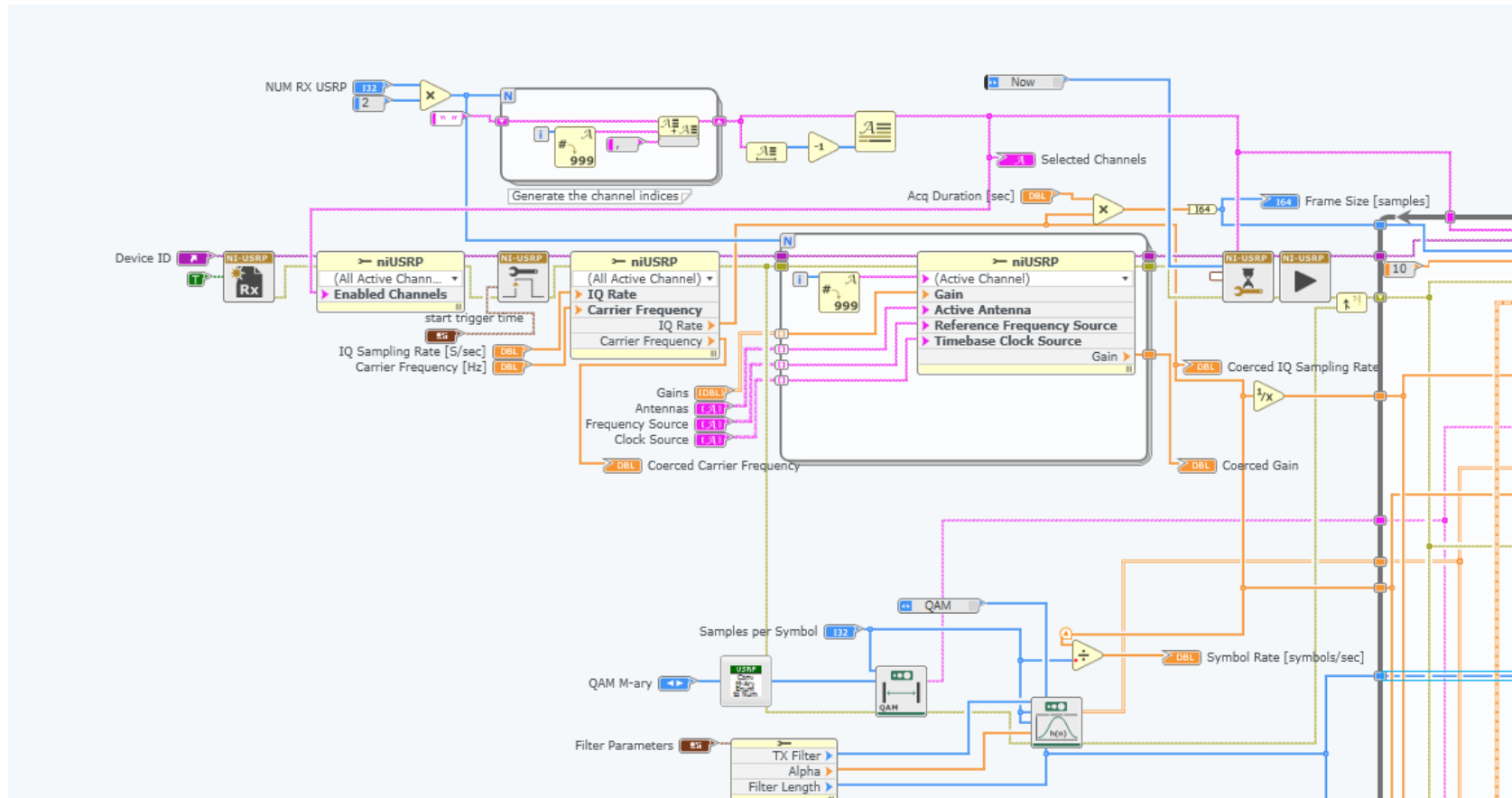
D.2 Diagrama de bloques de la modulación QPSK

D.2.1 Transmisión de la modulación QPSK

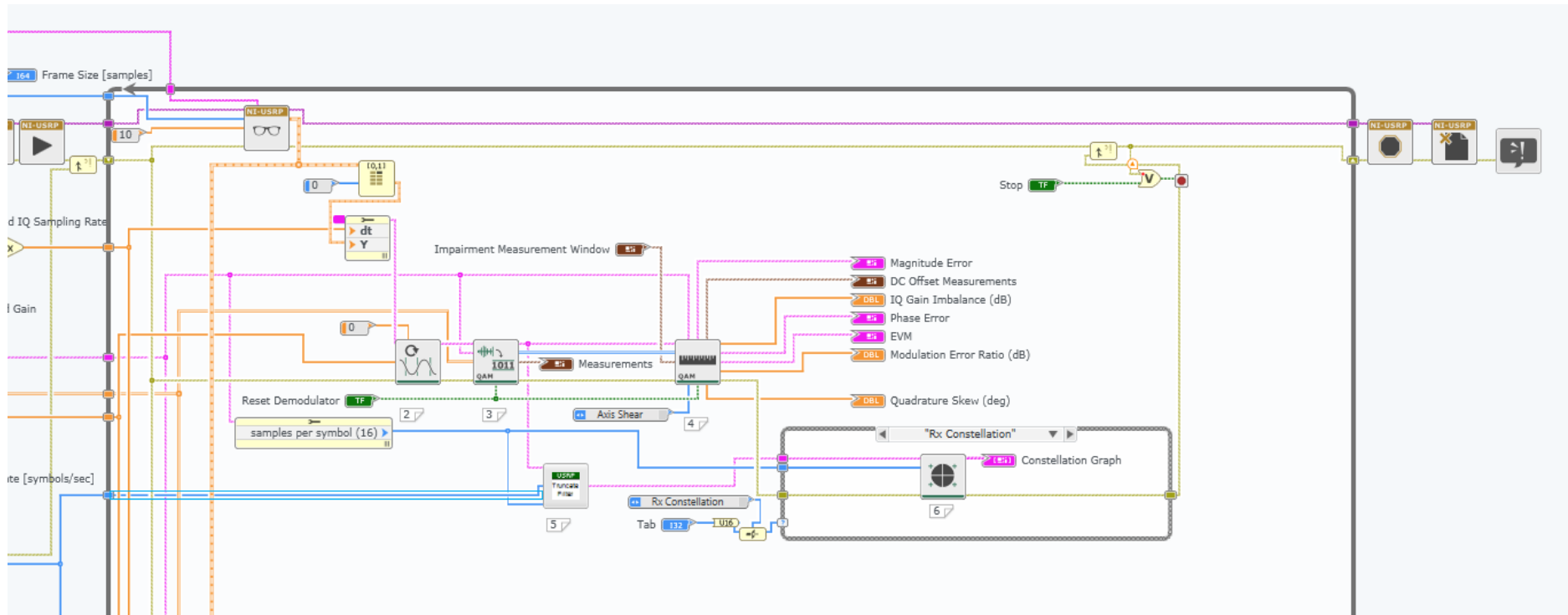


D.2.2 Recepción de la modulación QPSK

D.2.2.1 Recepción de la modulación QPSK – Parte 1



D.2.2.2 Recepción de la modulación QPSK – Parte 2



BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Leider Agredo Méndez, P. E. Jojoa y V. Almenar “Sistemas MIMO con un elevado número de antenas: clave para la 5G inalámbrica”, *Entramado*, vol. 11, n.º 2, pp. 250-261, 2015.
- [2] A. Jiménez de Luis, “El 95% de la población mundial tiene cobertura de telefonía móvil”, *El Mundo*, diciembre 2015.
- [3] D. B Naranjo, D. C. Buenaño, and I. Tenecora Mejía "Evolución de la tecnología móvil. Camino a 5G", *Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales*, 2016.
- [4] V. Banos, M. S. Afaqui, E. Lopez, & E. Garcia “Throughput and Range Characterization of IEEE 802.11 ah,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, n. º9, pp.1621-1628, 2017.
- [5] M. Luques, “Redes wireless-Tecnología MIMO-Análisis y performance del estándar de comunicaciones inalámbricas 802.11 n”, Especialización en Interconexión de Redes y Servicios, Dpto de Informática, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires, Argentina, 2009. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/4183> [Último acceso: marzo 2019].
- [6] J. J. Anguís Horno, “tecnología MIMO”, en *Redes de Área Local Inalámbricas: Diseño de la WLAN de Wheelers Lane Technology College Parte I: Estudio teórico*. Sevilla: e-reading, marzo 2008, 77-109.
- [7] E. Barrera Vargas, R. D. Ortega Almeida, “Análisis de cambios en características fundamentales de la telefonía celular desde 1G hasta 5G,” Especialista en Gerencia Comercial de Proyectos de Telecomunicaciones, Dpto de Telecomunicaciones,

Universidad Santo Tomas, Bucaramanga, Santander, Colombia, 2009. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11634/4405> [Último acceso: marzo 2019].

[8] “FDD/TDD/HDD” Disponible en: <https://laufquen.com.ar/fddtddhdd-y-que-es-tddhdd-split-frequency/> [Último acceso: marzo 2019].

[9] A. García Armada, “Apuntes de Comunicaciones móviles”.tsc.uc3m. https://aulaglobal.uc3m.es/pluginfile.php/2958632/mod_resource/content/1/CM-Tema%206-Parte2-2.pdf [Último acceso: abril 2019].

[10] L. W. Couch, R. J. Romero Elizondo, and J. L. Cuevas Ruiz. *Sistemas de comunicación digitales y analógicos*. 7th ed. Pearson Educación, 2008.

[11] R. Sotelo and D. Durán, “Modulación digital aplicación a la televisión digital en dvb,” *Memorias*, no. 6, pp. 42-63, 2008.

[12] W. H. W. Tuttlebee, “Software-defined radio: facets of a developing technology,” *IEEE Personal Communications*, vol. 6, pp. 38-4, abril 1999.

[13] C. Elliott, V. Vijayakumar, W. Zink y R. Hansen, “National Instruments LabVIEW: A Programming Environment for Laboratory Automation and Measurement”, *Journal of the Association for Laboratory Automation*, vol. 12, n. °1, pp. 17-24, febrero 2007.

[14] “National Instruments – Producto LabVIEW.” <http://www.ni.com/es-es/shop/labview.html> [Último acceso: abril 2019].

[15] A. Delgado Serrano, “Implementación de un sistema de antenas MIMO 2X2 en LabVIEW ” Trabajo de Fin de Grado, Dpto de Telecomunicaciones, Universidad Carlos

III, Madrid, España, 2015. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/23870>
[Último acceso: abril 2019]

[16] “National Instruments – Producto LabVIEW Communications.” <http://www.ni.com/es-es/shop/wireless-design-test/software-suites-for-wireless-design-and-test-category/what-is-labview-communications.html> [Último acceso: abril 2019].

[17] “National Instruments – Producto LabVIEW NXG.” <http://www.ni.com/es-es/shop/labview/labview-nxg.html> [Último acceso: abril 2019].

[18] “University of Bristol.” <http://www.bristol.ac.uk/homepage/> [Último acceso: abril 2019].

[19] “Lund University.” <https://lunduniversity.lu.se/> [Último acceso: abril 2019].

[20] “University Bristol – Project 5G.” <http://www.bristol.ac.uk/news/2016/march/massive-mimo.html> [Último acceso: abril 2019].

[21] “National Instruments – Producto USRP.” <https://www.ni.com/es-es/shop/select/usrp-software-defined-radio-device> [Último acceso: abril 2019].

[22] “Manual de especificaciones técnicas – Producto USRP-2942.” <http://www.ni.com/pdf/manuals/374410d.pdf> [Último acceso: mayo 2019].

[23] “Ettus Research – Producto VERT2450 Antenna.” <https://www.ettus.com/all-products/vert2450/> [Último acceso: abril 2019].

[24] “National Instruments – Producto Chasis PXI.” <http://www.ni.com/es-es/shop/select/pxi-chassis> [Último acceso: abril 2019].

[25] “Ettus Research – Producto OctoClock-G CDA-2990.” <https://www.ettus.com/all-products/octoclock-g/> [Último acceso: mayo 2019].

[26] “National Instruments – LabVIEW.” <https://forums.ni.com/t5/LabVIEW/PN-sequence-Generation/td-p/1050421?profile.language=es> [Último acceso: mayo 2019].

[27] G. J. González, “Aspectos de sincronización en frecuencia para sistemas multiportadora” Tesis de postgrado, Dpto de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, 2011. Disponible en: <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/2254> [Último acceso: mayo 2019]

[28] “Decisión no676/2002/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre un marco regulador de la política del espectro radioeléctrico en la Comunidad Europea”, *Decisión espectro radioeléctrico*, marzo 2002.

[29] “Real Decreto-ley 13/2012 por el que se transponen directivas en materia de comunicaciones electrónicas”, marzo 2012

[30] “Organización Internacional de Estándares.” <https://www.iso.org/standards.html> [Último acceso: mayo 2019].

[31] B. Clerckx, A. Lozano, S. Sesia, C. Van Rensburg, & C. B. Papadias "3GPP lte and lte-advanced.", 2009.

[32] “The Mobile Broadband Standard” https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1987-imt2020_workshop [Último acceso: mayo 2019].

[33] “Ley 24/2015 de Patentes”, julio 2015.

[34] “Creative Commons.” https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/deed.es_ES [Último acceso: mayo 2019].

[35] National Instruments “Desarrollo gráfico de sistemas”, *Instrumentation Newsletter*, enero 2012.

[36] National Instruments “La Evolución de LabVIEW: Décadas de Desarrollo”, *Instrumentation Newsletter*, mayo 2009.

[37] “National Instruments – Compromiso con el Medio Ambiente.” <http://www.ni.com/es-es/about-ni/corporate-responsibility/environment.html> [Último acceso: mayo 2019].

[38] “National Instruments – Producto USRP-2942.” <http://www.ni.com/es-es/support/model.usrp-2942.html> [Último acceso: mayo 2019].

[39] “National Instruments – Producto PXIe-1085.” <http://www.ni.com/es-es/support/model.pxie-1085.html> [Último acceso: mayo 2019].

[40] “National Instruments – Lincencia LabVIEW.” <http://www.ni.com/es-es/shop/labview/select-edition.html> [Último acceso: mayo 2019].

[41] “National Instruments – Producto Módulo PXI de Sincronización.” <https://www.ni.com/es-es/shop/select/pxi-synchronization-module> [Último acceso: mayo 2019].

[42] “Centro de componentes integrados.” <http://www.cimc.rs/index.php/equipment/88-dso90254a-oscilloscope> [Último acceso: mayo 2019].